



计算机科学

COMPUTER SCIENCE

考虑时变参数的自适应LQR智能车辆路径跟踪控制方法

张亚娟, 冯灵霞, 李国斌

引用本文

张亚娟, 冯灵霞, 李国斌. [考虑时变参数的自适应LQR智能车辆路径跟踪控制方法](#)[J]. 计算机科学, 2025, 52(10): 308-316.

ZHANG Yajuan, FENG Lingxia, LI Guobin. [Adaptive LQR Intelligent Vehicle Path Tracking Control Method Considering Time-varyingParameters](#) [J]. Computer Science, 2025, 52(10): 308-316.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

考虑时变参数的自适应 LQR 智能车辆路径跟踪控制方法

张亚娟^{1,3} 冯灵霞¹ 李国斌²

1 黄河科技学院工学部 郑州 450000

2 河南理工大学软件学院 河南 焦作 454000

3 郑州市北斗高精度定位授时工程技术研究中心 郑州 450000

(gdlfyed@163.com)

摘要 为解决智能车辆循迹过程中,轮胎侧偏刚度扰动引发模型不确定导致的车辆循迹精度及稳定性下降的问题,提出了一种考虑轮胎侧偏刚度时变特性的智能车辆循迹控制方法。首先,基于改进的集员滤波算法及双轨动力学模型建立轮胎侧向力估计器,利用轮胎侧向力模型计算值与估计值之差设计轮胎侧偏刚度自适应更新规则;其次,将实时更新的轮胎侧偏刚度用于求解实时最优前轮转角,进而提出一种轮胎侧偏刚度自适应的 ALQR 智能车辆循迹控制器。CarSim 与 Simulink 联合仿真和硬件在环仿真实验结果表明:ALQR 控制器在高、低路面附着系数条件下较 LQR(Linear Quadratic Regulator)跟踪精度平均提高 65.867%,尤其在低附路面,LQR 控制器忽略了轮胎刚度变化引发的循迹性能显著下降的问题,而 ALQR 控制器可通过实时更新的轮胎侧偏刚度实时求解最优前轮转角,保证了车辆循迹精度与稳定性。提出的考虑轮胎实时侧偏刚度的智能车辆循迹 ALQR 控制方法具有良好的适用性与实时性,对智能车辆控制系统设计具有重要的参考价值。

关键词: 智能车辆;路径跟踪控制;侧向力估计;轮胎侧偏刚度;LQR;硬件在环

中图分类号 U461.1

Adaptive LQR Intelligent Vehicle Path Tracking Control Method Considering Time-varying Parameters

ZHANG Yajuan^{1,3}, FENG Lingxia¹ and LI Guobin²

1 Engineering Department, Huanghe S & T University, Zhengzhou 450000, China

2 School of Software, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China

3 Zhengzhou Beidou High Precision Positioning and Timing Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 450000, China

Abstract To solve the problem of vehicle tracking accuracy and stability degradation caused by model uncertainty resulting from tire cornering stiffness perturbation in the tracking process of intelligent vehicles, this paper proposes a tracking control method for intelligent vehicles considering the time-varying characteristics of tire cornering stiffness. Firstly, the tire lateral force estimator is established based on the improved set membership filter algorithm and the two-track dynamic model. The adaptive update rule of tire cornering stiffness is designed by using the difference between the calculated value and the estimated value of the tire lateral force model. Secondly, the real-time updated tire cornering stiffness is used to solve the real-time optimal front wheel angle, and then an ALQR intelligent vehicle tracking controller with adaptive tire cornering stiffness is proposed. The results of CarSim and Simulink co-simulation and hardware-in-the-loop simulation show that the proposed ALQR controller improves the tracking accuracy by 65.867% on average compared with LQR under the condition of high and low road adhesion coefficient. In particular, the LQR controller ignores the significant decline in tracking performance caused by changes in tire stiffness on low-adhesion roads. The proposed ALQR controller can solve the optimal front wheel angle in real time through real-time updated tire cornering stiffness to ensure vehicle tracking accuracy and stability. The tracking ALQR control method of intelligent vehicle considering real-time tire cornering stiffness proposed in this paper has good applicability.

Keywords Intelligent vehicle, Path following control, Lateral force estimation, Tire cornering stiffness, LQR, Hardware-in-the-loop(HIL)

到稿日期:2024-08-21 返修日期:2024-10-30

基金项目:教育部产学研合作协同育人项目(220803631295944);河南省科技攻关计划(172102210380);河南省高等学校重点科研项目计划(24B520021,24B413005);河南省研究生教育改革与质量提升工程项目(YJS2023JD67)

This work was supported by the Collaborative Education Project of the Ministry of Education(220803631295944), Scientific and Technological Research Projects in Henan Province(172102210380), Key Research Projects Plan for Higher Education Institutions in Henan Province(24B520021,24B413005) and Graduate Education Reform and Quality Improvement Project in Henan Province(YJS2023JD67).

通信作者:冯灵霞(2279087233@qq.com)

随着汽车技术的发展,新生代车辆不仅具备新的动力能源,还具备更先进、智能的技术,通过搭载先进传感器等设备,运用人工智能等新技术,正逐步发展为具备自动驾驶功能的智能移动生活空间^[1-3]。运动控制是保证自动驾驶汽车能安全稳定地完成路径跟踪任务的关键^[4]。为保证循迹过程中的跟踪精度与稳定性,国内外学者展开了广泛研究,提出了一系列跟踪控制算法,其中包括比例-积分-微分(Proportional Integral Differentiation, PID)^[5]、模糊控制(Fuzzy Control, FC)^[6]、滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)^[7]、最优控制(Linear Quadratic Regulator, LQR)^[8-9]和模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)^[10]。LQR(Linear Quadratic Regulator)因不需要在线优化求解,节省了大量的计算资源,具有较好的实车应用前景,所以研究人员对其开展了广泛研究^[11]。Hu等^[12]考虑权重矩阵对LQR控制的影响,运用模糊原理基于车辆状态设计自适应权重系数。Xu等^[13]考虑路径跟踪过程中的动力学干扰,基于二自由度横向误差模型,利用LQR算法求解带动态干扰的最优控制问题。Yang等^[14]考虑未来一段时间内路径变化对预瞄时间的影响,设计前馈+预瞄控制器以提升LQR控制器性能。但现有研究多针对高附着路面,较少探讨同场景低附着路面算法的适用性,且在目标转角求解过程中,通常将轮胎侧偏刚度取为定值。

轮胎侧偏刚度的动态特性是模型不确定性的主要来源之一,该值会随着路面附着系数、轮胎侧向力、轮胎侧偏角等参数的变化而变化,此类不确定性严重制约了控制算法的循迹精度、稳定性及适用性能^[15]。获知车辆实时状态参数是提升车辆控制稳定性的重要前提^[16]。Fu等^[17]考虑车辆行驶状态过程中轮胎侧偏刚度的时变特性,在整车模型中引入递推最小二乘法实时更新轮胎侧偏刚度,提高了在极限工况下车辆状态估计精度,为整车稳定性控制提供了准确的参数。Liang等^[18]基于行车过程中轮胎侧偏刚度的变化特性,引进多模型自适应理论,设计多个顶点模型覆盖轮胎侧偏刚度摄动范围并求解多模型自适应控制律,显著提高了控制系统的鲁棒性。轮胎作为车辆与地面唯一直接接触的部件,其动力学特性对车辆运动控制至关重要^[19]。轮胎侧偏刚度为轮胎实时动力学参数的重要表征参数之一,若忽略行车过程中轮胎侧偏刚度的动态变化,尤其在非线性状态下,会导致路径跟踪精度及鲁棒性变差^[20]。

鉴于此,本文提出了一种考虑轮胎侧偏刚度时变特性的ALQR(Adaptive Linear Quadratic Regulator)循迹控制器。首先,基于实时估计的轮胎侧偏力,设计了一种可表征真实轮胎侧偏刚度时变特性的自适应更新规则。以侧向加速度、横摆角速度等可观变量为输入,以前、后轮侧偏力为输出,基于集员滤波算法,考虑初始噪声设置边界失效所导致的估计误差,引进渐消因子及残差序列预测椭圆形状矩阵并实时更新校正,完成对轮胎侧向力估计器的设计。通过求解侧向力估计值与模型计算值间的误差,引进自适应修正因子,进而设计一种轮胎侧偏刚度自适应更新规则。其次,基于车-路位置关系及动力学分析建立二自由度横向误差模型,用实时更新的轮胎侧偏刚度替换模型中的定值侧偏刚度,利用LQR理论求解包含实时更新轮胎侧偏刚度的状态矩阵,完成ALQR控制

器设计。最后,基于CarSim与Simulink的联合仿真及硬件在环仿真实验对本文提出的方法进行验证与分析。

1 二自由度横向误差模型

二自由度横向误差模型将二自由度动力学模型及车-路横向位置模型相结合,可同时表征简化后的车辆运动特性及横向位置关系。本文主要研究前轮转向控制,主要涉及侧向及横摆运动,故将车辆动力学模型简化为二自由度横向动力学模型。忽略转向系统及悬架的影响^[21],以前轮转角作为输入,近似认为车辆只进行平行于地面的平面运动。

图1中 F_{yf} 和 F_{yr} 为前、后轴轮胎所受侧偏力, α_f 和 α_r 为前、后轮侧偏角, δ 为前轮转角, O 为车辆质心, v 为质心车速, β 为质心侧偏角, l_f 和 l_r 为前、后轴到质心的距离, e_d 为车辆与期望轨迹的横向误差, θ 为车辆的航向角, θ_r 为期望轨迹的航向角。

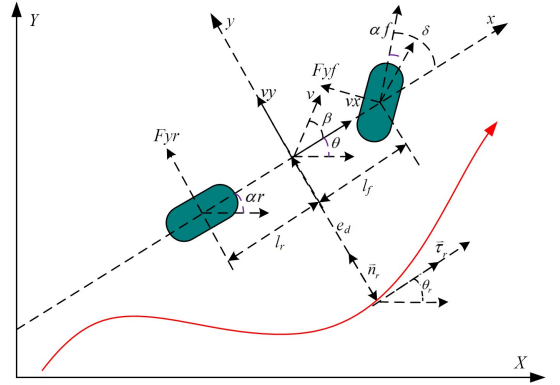


图1 二自由度横向误差模型

Fig. 1 Two-degree-of-freedom lateral error model

根据牛顿第二定律,对其二自由度模型进行受力分析,得出二自由度模型的微分方程:

$$\begin{aligned} m a_y &= F_{yf} + F_{yr} \\ &= C_f \left(\frac{l_f \dot{\varphi} + v_y}{v_x} - \delta \right) + C_r \left(\frac{v_y - \dot{\varphi} l_r}{v_x} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} I_z \ddot{\varphi} &= l_f F_{yf} - l_r F_{yr} \\ &= l_f C_f \left(\frac{l_f \dot{\varphi} + v_y}{v_x} - \delta \right) - l_r C_r \left(\frac{v_y - \dot{\varphi} l_r}{v_x} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

令 $v_y = \dot{y}$, 原微分方程的状态空间形式为:

$$\begin{bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{C_f + C_r}{m v_x} & \frac{l_f C_f - l_r C_r - v_x}{m v_x} \\ \frac{l_f C_f - l_r C_f}{I_z v_x} & \frac{l_f^2 C_f + l_r^2 C_r}{I_z v_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{C_f}{m} \\ -\frac{l_f C_r}{I_z} \end{bmatrix} \delta \quad (3)$$

其中, φ 为车辆的横摆角, C_f 和 C_r 分别为前、后轮总的侧偏刚度, I_z 为绕Z轴的转动惯量, v_x 为车辆纵向车速。

如图1所示,智能车辆路径跟踪过程中与期望路径之间会产生两种误差:质心与期望路径点 P_{n-10} 之间的距离误差 e_d 及方向误差 $e_\theta(\theta - \theta_r)$ 。跟踪控制器的设计目的是消除误差从而实现路径跟踪。期望路径点 P_{n-10} 为质心在期望路径

上面的投影点,由此可得出横向误差的变化率为:

$$\dot{e}_d = |v| \cdot \sin(\theta - \theta_r) \quad (4)$$

航向角与横摆角及质心侧偏角的关系为 $\theta = \varphi + \beta$, 由二自由度动力学模型可得 $v_x = v \cdot \cos\beta$, $v_y = v \cdot \sin\beta$. $e_\theta = \theta - \theta_r$, 忽略质心侧偏角 β , 令 $e_\theta = e_\varphi = \varphi - \theta_r$, 式(4)可化简为:

$$\dot{e}_d = v_x \cdot e_\varphi + v_y \quad (5)$$

本部分注重建立横向误差模型,故将 v_x 视作常量。通常所规划的路径应该是连续光滑的曲线,由于 θ_r 设计的比较顺滑,因此 $\ddot{\theta}_r$ 可忽略不计^[22], 由此可得:

$$v_y = \dot{e}_d - v_x \cdot e_\varphi \quad (6)$$

$$\dot{v}_y = \ddot{e}_d - v_x \cdot \dot{e}_\varphi \quad (7)$$

$$\dot{\phi} = \dot{e}_\varphi + \dot{\theta}_r \quad (8)$$

$$\ddot{\phi} = \ddot{e}_\varphi \quad (9)$$

将上式与二自由度动力学方程联立可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_d \\ \ddot{e}_d \\ \dot{e}_\varphi \\ \ddot{e}_\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C_f + C_r}{mv_x} & -\frac{C_f + C_r}{m} & \frac{l_f C_f - l_r C_r}{mv_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{l_f C_f - l_r C_r}{I_z v_x} & \frac{l_f C_f - l_r C_r}{I_z} & \frac{l_f^2 C_f + l_r^2 C_r}{I_z v_x} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_d \\ \dot{e}_d \\ e_\varphi \\ \dot{e}_\varphi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{C_f}{m} \\ 0 \\ -\frac{l_f C_f}{I_z} \end{bmatrix} \cdot \delta + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{l_f C_f - l_r C_r}{mv_x} - v_x \\ 0 \\ \frac{l_f^2 C_f + l_r^2 C_r}{I_z v_x} \end{bmatrix} \cdot \dot{\theta}_r \quad (10)$$

令:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C_f + C_r}{mv_x} & -\frac{C_f + C_r}{m} & \frac{l_f C_f - l_r C_r}{mv_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{l_f C_f - l_r C_r}{I_z v_x} & \frac{l_f C_f - l_r C_r}{I_z} & \frac{l_f^2 C_f + l_r^2 C_r}{I_z v_x} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{C_f}{m} \\ 0 \\ -\frac{l_f C_f}{I_z} \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{l_f C_f - l_r C_r}{mv_x} - v_x \\ 0 \\ \frac{l_f^2 C_f + l_r^2 C_r}{I_z v_x} \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} e_d \\ \dot{e}_d \\ e_\varphi \\ \dot{e}_\varphi \end{bmatrix},$$

$$U = \delta$$

将其带入式(7),即可得到横向误差的状态空间表达式:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}U + \mathbf{C}\dot{\theta}_r \quad (11)$$

2 轮胎侧向力估计

2.1 改进的集员滤波算法

考虑如式(12)所示的线性系统^[23]:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{z}_{k+1} = \mathbf{H}\mathbf{x}_{k+1} + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (12)$$

其中, \mathbf{x}_k 为状态向量, \mathbf{z}_{k+1} 为观测向量, \mathbf{F} 和 \mathbf{H} 分别为状态矩阵与观测矩阵, \mathbf{w}_k 和 \mathbf{v}_k 分别为过程噪声与观测噪声。

假设系统噪声未知且有界,一般表示为椭球集合^[24]:

$$\mathbf{W}_k = \{\mathbf{w}_k : \mathbf{w}_k^T \mathbf{Q}_k^{-1} \mathbf{w}_k \leq 1\} \quad (13)$$

$$\mathbf{V}_k = \{\mathbf{v}_k : \mathbf{v}_k^T \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{v}_k \leq 1\}$$

其中, \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} 为正定矩阵。

$$\text{初始状态满足: } (\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_0)^T \mathbf{P}_0^{-1} (\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_0) \leq 1$$

其中, \mathbf{P}_0 为正定矩阵; \mathbf{x}_0 为椭球中心,属于椭球集合,并与状态方程、观测方程、椭球集合中相一致的点组成系统的状态可行集。

车辆真实行车环境复杂且多变,仅将噪声设置为高斯白噪声很难满足真实行车环境,当车辆处于非线性工况下,车辆模型参数失配较为严重,真实值将超过设定的噪声边界,导致估计精度下降。

为解决上述问题,引入渐消因子,依据残差序列进一步预测椭球形状矩阵并进行实时校正,解决模型失配导致估计精度下降的问题,进而提高复杂工况下滤波算法的跟踪能力及鲁棒性。

改进集员滤波算法的具体步骤如下。

1) 时间更新

预测椭球中心:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- = \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{x}}_k^+ \quad (14)$$

引入渐消因子预测椭球形状矩阵:

$$\mathbf{P}_{k+1}^- = \lambda_{k+1} (1 - \beta_{k+1})^{-1} \mathbf{F}_k \mathbf{P}_k^+ \mathbf{F}_k^T + \beta_{k+1}^{-1} \mathbf{Q}_k \quad (15)$$

其中,渐消因子如下所示:

$$\lambda_{k+1} = \begin{cases} 1, & \lambda_0 < 1 \\ \lambda_0, & \lambda_0 \geq 1 \end{cases}, \lambda_0 = \text{tr}(\mathbf{N}_{k+1}) / \text{tr}(\mathbf{M}_{k+1})$$

$$\mathbf{N}_{k+1} = \mathbf{V}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{Q}_k \mathbf{H}_{k+1}^T - \mathbf{R}_{k+1}$$

$$\mathbf{M}_{k+1} = \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{F}_k \mathbf{P}_k^+ \mathbf{F}_k^T \mathbf{H}_{k+1}^T$$

其中, tr 为矩阵的迹。

残差序列椭球形状矩阵为:

$$\mathbf{V}_{k+1} = \begin{cases} \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1^T, & k=0 \\ (\eta \mathbf{V}_k + \mathbf{e}_{k+1} \mathbf{e}_{k+1}^T) / (1 + \eta), & k \geq 1 \end{cases} \quad (16)$$

其中, η 为遗忘因子。

2) 观测更新

(1) 取时间更新结果序贯观测的初始值:

$$\hat{\mathbf{x}}_{0,k+1}^+ = \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^-, \mathbf{P}_{0,k+1}^+ = \mathbf{P}_{k+1}^- \quad (17)$$

(2) 计算增益:

$$\mathbf{K}_{i,k+1} = (1 - \rho_{k+1})^{-1} \mathbf{P}_{i-1,k+1}^+ \mathbf{H}_{i,k+1}^T \mathbf{W}_{i,k+1}^{-1} \quad (18)$$

其中,

$$\mathbf{W}_{i,k+1} = \mathbf{H}_{i,k+1} (1 - \rho_{k+1})^{-1} \mathbf{P}_{i-1,k+1}^+ \mathbf{H}_{i,k+1}^T + \rho_{k+1}^{-1} \mathbf{R}_{i,k+1}$$

(3) 观测更新椭球中心:

$$\hat{\mathbf{x}}_{i,k+1} = \hat{\mathbf{x}}_{i-1,k+1} + \mathbf{K}_{i,k+1} \mathbf{e}_{i,k+1} \quad (19)$$

其中, $\mathbf{e}_{i,k+1} = \mathbf{z}_{i,k+1} - \mathbf{H}_{i,k+1} \hat{\mathbf{x}}_{i-1,k+1}^+$ 。

(4) 观测更新椭球形状矩阵:

$$\mathbf{P}_{i,k+1}^+ = (1 - \mathbf{e}_{i,k+1}^T \mathbf{W}_{i,k+1}^{-1} \mathbf{e}_{i,k+1}) \cdot ((\mathbf{I} - \mathbf{K}_{i,k+1} \mathbf{H}_{i,k+1}) (1 - \rho_{k+1})^{-1} \mathbf{P}_{i-1,k+1}^+ + \rho_{k+1}^{-1} \mathbf{R}_{i,k+1}) \quad (20)$$

其中, β 和 ρ 为椭球形状自适应参数变量,其自适应选择机制为:

$$\beta_{k+1} = \frac{\sqrt{\text{tr}(\mathbf{Q}_k)}}{\sqrt{\text{tr}(\mathbf{F}_k \mathbf{P}_k^+ \mathbf{F}_k^T) + \sqrt{\text{tr}(\mathbf{Q}_k)}}} \quad (21)$$

$$\rho_{k+1} = \frac{\sqrt{r_m}}{\sqrt{\rho_m} + \sqrt{r_m}}$$

其中, r_m 和 p_m 为矩阵 \mathbf{R}_{k+1} 及 $\mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1}^{-1} \mathbf{H}_{k+1}^T$ 的最大奇异值。

2.2 侧向力估计

考虑到测量轮胎侧向力传感器成本过高或只适用于试验车,直接测量难度较大,本文基于上文改进的集员滤波算法,以容易可观的侧向加速度、横摆角速度等变量为输入,以前、后轮胎侧向力为输出,设计了一种轮胎侧偏力估计器。

七自由度模型^[25]如图 2 所示。

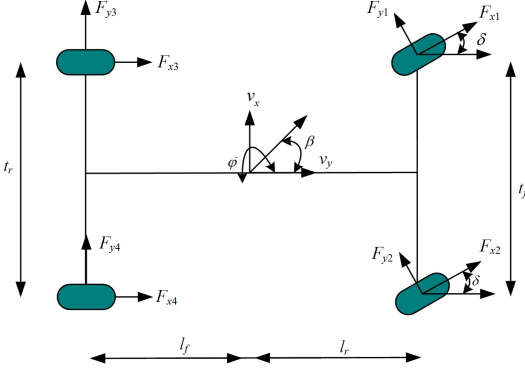


图 2 七自由度模型

Fig. 2 Seven-degree-of-freedom model

对其进行受力分析,可作如下表示:

$$\begin{aligned} m a_x &= F_{x_f} \cos \delta - F_{y_f} \sin \delta + F_{x_r} \\ m a_y &= F_{x_f} \sin \delta + F_{y_f} \cos \delta + F_{y_r} \\ I_z \dot{\varphi} &= l_f (F_{x_f} \sin \delta + F_{y_f} \cos \delta) - l_r F_{y_r} + t_r \Delta F_{x_r} / 2 + \\ &\quad t_f (\Delta F_{x_f} \cos \delta - \Delta F_{y_f} \sin \delta) / 2 \end{aligned} \quad (22)$$

其中, $\Delta F_{x_f} = F_{x2} - F_{x1}$, $\Delta F_{x_r} = F_{x4} - F_{x3}$, $\Delta F_{y_f} = F_{y2} - F_{y1}$ 。

轮胎侧向力估计器为:

$$\begin{cases} \dot{x}_A = F x_A + u_A + w_A \\ z_A = H x_A + v_A \end{cases} \quad (23)$$

选取状态向量 $\mathbf{x}_A = [F_{y_f} \ F_{y_r} \ \Delta F_{y_f}]^T$, 观测向量 $\mathbf{z}_A =$

$[a_x a_y \dot{\varphi}]^T$ 。

基于双轨动力学模型,四轮垂直载荷占比为:

$$\begin{aligned} F_{y1} &= \frac{F_{z1}}{F_{z1} + F_{z2}} F_{y_f}, F_{y2} = \frac{F_{z2}}{F_{z1} + F_{z2}} F_{y_f} \\ F_{y3} &= \frac{F_{z3}}{F_{z3} + F_{z4}} F_{y_r}, F_{y4} = \frac{F_{z4}}{F_{z3} + F_{z4}} F_{y_r} \end{aligned} \quad (24)$$

4 个车轮的垂直载荷为:

$$\begin{aligned} F_{z1,2} &= \frac{m l_f g}{2(l_f + l_r)} - \frac{m h a_x}{2(a + l_r)} \mp \frac{m h l_r a_y}{(l_f + l_r) t_f} \\ F_{z3,4} &= \frac{m l_f g}{2(l_f + l_r)} + \frac{m h a_x}{2(l_f + l_r)} \mp \frac{m h l_f a_y}{(l_f + l_r) t_r} \end{aligned} \quad (25)$$

2.3 侧向力估计验证

为验证估计器的有效性,基于 Simulink 和 CarSim 搭建联合仿真平台。连续弯道可验证估计器在车辆左转及右转时的有效性,较高车速可验证估计器在侧偏力、侧偏角较大幅度变化下的准确性,故设置如图 3 所示的连续换道工况,车速为 96 km/h,路面附着系数为 0.8,其仿真结果如图 4 所示。

由仿真实验结果可知:前后轴侧向力估计最大误差分别为 94.898 N, 56.077 N。本文所提及的轮胎侧向力估计器对前后轮侧向力真实值跟踪精度较高,可提供给第 3.2 节自适应轮胎侧偏刚度准确的侧向力输入。

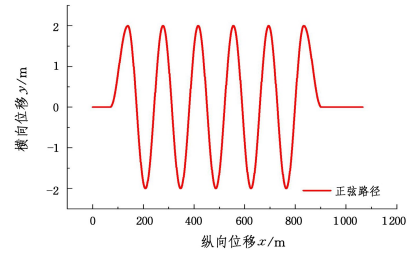


图 3 正弦路径

Fig. 3 Sine path

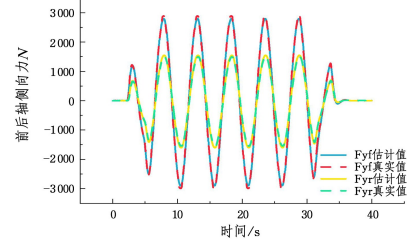


图 4 轮胎侧向力估计器效果图

Fig. 4 Tire lateral force estimator effect diagram

3 自适应 LQR 控制器设计

3.1 LQR 控制器设计

采用 LQR 理论求解路径跟踪控制中的前轮转角。根据横向误差的状态空间表达式,暂时忽略 $\mathbf{C}\dot{\theta}_r$, 求解反馈系数从而得到反馈控制;基于反馈控制及上述忽略的 $\mathbf{C}\dot{\theta}_r$, 设计前馈控制求解最终前轮转角,补偿忽略 $\mathbf{C}\dot{\theta}_r$ 所带来的误差,最终使距离误差以及方向误差尽可能为 0。对 LQR 控制理论来说,其目的是为了求解最优控制律,在保证跟踪性能的同时,输入控制量要尽可能小,故 LQR 控制的评价函数以及约束函数^[24]应为:

$$\begin{cases} J = \sum_{k=0}^{+\infty} (\mathbf{X}_k^T \mathbf{Q} \mathbf{X}_k + \mathbf{U}_k^T \mathbf{R} \mathbf{U}_k) \\ \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \mathbf{X} + \mathbf{B} \mathbf{U} \end{cases} \quad (26)$$

其中, $\mathbf{Q} = \text{diag}[q_1, q_2, q_3, q_4]$, 矩阵中 4 个参数分别代表控制器对 e_d (横向误差)、 \dot{e}_d (横向误差变化率)、 e_φ (航向误差) 和 \dot{e}_φ (航向误差变化率) 的重视程度, $\mathbf{R} = [r]$ 表示控制器对前轮转角的重视程度。依据积分中值定理,利用中点欧拉法和向前欧拉法相结合的方法对 $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \mathbf{X} + \mathbf{B} \mathbf{U}$ 进行离散化处理。

$$\mathbf{X}_{k+1} = \bar{\mathbf{A}} \mathbf{X}_k + \bar{\mathbf{B}} \mathbf{U}_k \quad (27)$$

其中, $\bar{\mathbf{A}} = \left(\mathbf{I} - \frac{\mathbf{A} dt}{2} \right)^{-1} \cdot \left(\mathbf{I} + \frac{\mathbf{A} dt}{2} \right)$, $\bar{\mathbf{B}} = \mathbf{B} dt$, \mathbf{I} 为单位矩阵, dt

为采样时间。评价函数 J 在约束条件 $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \mathbf{X} + \mathbf{B} \mathbf{U}$ 下的最小值表达式为:

$$J_{\min} = \sum_{k=0}^{n-1} (\mathbf{H}_k - \boldsymbol{\gamma}_k^T \mathbf{X}_k) + \mathbf{X}_n^T \mathbf{Q} \mathbf{X}_n - \boldsymbol{\gamma}_n^T \mathbf{X}_n + \boldsymbol{\gamma}_0^T \mathbf{X}_0 \quad (28)$$

其中, $\mathbf{H}_k = (\mathbf{X}_k^T \mathbf{Q} \mathbf{X}_k + \mathbf{U}_k^T \mathbf{R} \mathbf{U}_k)$, 依据向量求导法则,令 $\boldsymbol{\gamma}_k = 2 \mathbf{P}_k \mathbf{X}_k$, 可推得黎卡提方程为:

$$\mathbf{P}_{k-1} = \mathbf{Q} + \bar{\mathbf{A}}^T \mathbf{P}_k (\mathbf{I} + \bar{\mathbf{B}} \mathbf{R}^{-1} \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{P}_k)^{-1} \bar{\mathbf{A}} \quad (29)$$

通过求解黎卡提方程,可得:

$$\mathbf{U}_k = -(\mathbf{R} + \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{P}_k \bar{\mathbf{B}})^{-1} \bar{\mathbf{B}}^T \bar{\mathbf{P}} \mathbf{A} \mathbf{X}_k \quad (30)$$

令 $\mathbf{K} = (\mathbf{R} + \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B}^{-1}) \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{A}$, 式(30)可化简为:

$$\mathbf{U}_k = -\mathbf{K} \mathbf{X}_k \quad (31)$$

其中, $\mathbf{K} = [K_1, K_2, K_3, K_4]$ 为 LQR 控制的反馈系数。

为解决稳态误差导致的跟踪精度下降的问题, 引入前馈

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \frac{1}{K_1} \cdot \left\{ \delta_f - \frac{\dot{\theta}_r}{v_x} \cdot \left[l_f + l_r - l_r K_3 - \frac{m v_x^2}{l_f + l_r} \cdot \left(\frac{l_r}{C_f} + \frac{l_f}{C_r} \cdot K_3 - \frac{l_f}{C_r} \right) \right] \right\} \\ 0 \\ -\frac{\dot{\theta}_r}{v_x} \left(l_r + \frac{l_f}{l_f + l_r} \cdot \frac{m v_x^2}{C_r} \right) \\ 0 \end{bmatrix}$$

根据曲率定义化简可得: $\dot{\theta}_r/v_x \approx k$, 稳态误差中的 e_φ (航向误差) 与前馈控制 δ_f 无关, 故不需要前馈控制消除。所得到的前馈控制部分为:

$$\delta_f = k \left[l_f + l_r - l_r K_3 - \frac{m v_x^2}{l_f + l_r} \left(\frac{l_r}{C_f} + \frac{l_f}{C_r} K_3 - \frac{l_f}{C_r} \right) \right] \quad (33)$$

3.2 侧偏刚度自适应准则

当车速较低或行驶工况较简单时, 轮胎处于线性区, 传统的线性轮胎侧偏刚度可满足控制器循迹要求。随着车速及工况复杂程度的提高, 轮胎逐渐过渡到非线性区, 线性侧偏刚度已无法满足控制器需求, 导致跟踪精度及稳定性下降。对此, 考虑到轮胎侧向力与侧偏刚度的关系 ($C = F/\alpha$)^[26], 依据上文所实时估计的轮胎侧向力, 设计侧偏刚度自适应准则, 为 LQR 控制器提供准确的轮胎侧偏刚度参数。

若直接利用改进集员滤波所估计出的前后轮侧向力与侧偏角作商得到侧偏刚度, 将会在侧偏角 α 为 0 时求解失败^[27], 故本文设计基于轮胎侧向力的轮胎侧偏刚度自适应准则。定义前后轮侧偏刚度自适应因子为:

$$\lambda_f = \frac{\hat{F}_{yf} - F_{yf}}{|\hat{F}_{yf}|}, \lambda_r = \frac{\hat{F}_{yr} - F_{yr}}{|\hat{F}_{yr}|} \quad (34)$$

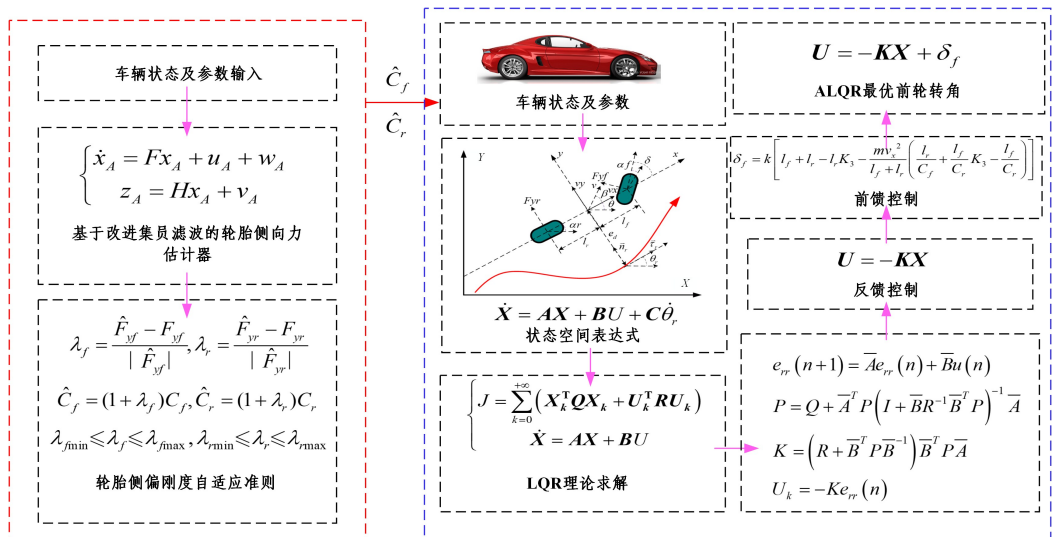


图5 ALQR 控制器原理图

Fig. 5 Schematic diagram of ALQR controller

4 仿真实验验证

为验证本文所提 ALQR 控制器的有效性, 开展基于 Car-

控制 δ_f , 将式(17)代入式(11), 在系统稳定后 $\dot{\mathbf{X}}=0$, 再将 $\mathbf{U} = -\mathbf{K} \mathbf{X} + \delta_f$ 代入可得系统的稳态误差为:

$$\mathbf{X} = -(\mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{K})^{-1} (\mathbf{B} \delta_f + \mathbf{C} \theta_r) \quad (32)$$

通过软件 Mathematic 计算化简:

自适应轮胎侧偏刚度可表示为:

$$\hat{C}_f = (1 + \lambda_f) C_f, \hat{C}_r = (1 + \lambda_r) C_r \quad (35)$$

为避免测量噪声及自适应因子幅值变化对跟踪控制器性能的影响, 对自适应因子作如下约束:

$$\lambda_{f\min} \leq \lambda_f \leq \lambda_{f\max}, \lambda_{r\min} \leq \lambda_r \leq \lambda_{r\max} \quad (36)$$

其中, $\lambda_{f\min} = \lambda_{r\min} = -0.5$, $\lambda_{f\max} = \lambda_{r\max} = 1$ 。为避免轮胎侧向力估计值为 0 时自适应因子求解失败, 故规定当轮胎侧偏角小于 $\alpha \leq 0.1^\circ$ 时, 自适应因子为 0, 此时线性轮胎侧偏刚度可满足控制器需求。

3.3 ALQR 控制器设计原理

首先, 计算轮胎侧偏刚度为定值条件下轮胎侧偏力的大小(模型计算值), 基于侧向力估计器所输出的真实轮胎侧向力与模型计算值间的差值, 引进前文所设计的轮胎侧偏刚度自适应因子, 输出实时表征真实轮胎侧偏刚度时变特性的参数。其次, 将横向误差状态空间矩阵中的 C_f 和 C_r (轮胎侧偏刚度定值) 替换为式(35)中的 \hat{C}_f 和 \hat{C}_r (自适应轮胎侧偏刚度), 从而完成考虑轮胎侧偏刚度时变特性的 ALQR 循迹控制器设计, 具体的 ALQR 设计理论如图 5 所示。

Sim 与 Simulink 的联合仿真实验。为更好地验证 ALQR 控制器在不同路面附着系数条件下的有效性, 分别选取路面附着系数为 0.85 (高附着) 及 0.4 (低附着) 的连续换道

工况^[28-29],仿真参数如表 1 所列。

表 1 车辆参数
Table 1 Vehicle parameters

参数名称	数值	单位
整车质量	1412	kg
前轴侧偏刚度	-149 000	N/rad
后轴侧偏刚度	-112 200	N/rad
Z 轴转动惯量	1536.7	kg·m ²
前轴-质心距离	1.015	m
后轴-质心距离	1.895	m

4.1 高附着实验工况

设置路面附着系数为 0.85,车辆速度为 72 km/h,图 6、图 7 分别为跟踪效果及横向误差图。在第二次变道时,LQR 控制器出现了较大的横向误差,最大值为 1.1 m,而 ALQR 控制器的最大横向误差为 0.3 m。由此可见,ALQR 控制器的跟踪精度更高。图 8、图 9 展示了路径跟踪过程中横摆角速度及质心侧偏角的变化特性,整个跟踪过程中 ALQR 相对变化较平稳,而 LQR 出现了骤增骤减的现象,此时车辆处于不稳定状态,严重影响了路径跟踪过程中车辆的稳定性及安全性,由此可见,ALQR 控制器的稳定性更好。

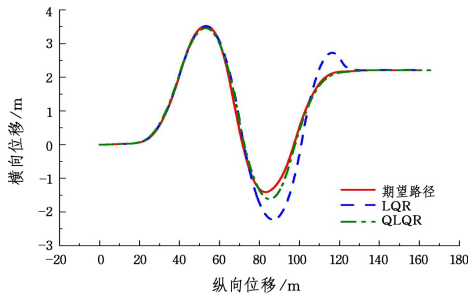


图 6 高附着路径跟踪效果图

Fig. 6 High attachment path tracking renderings

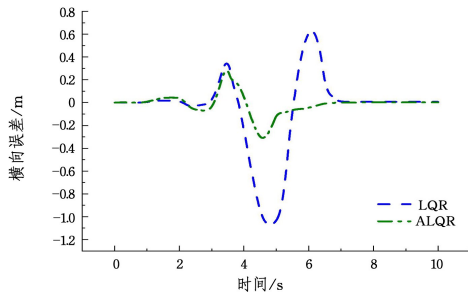


图 7 高附着横向误差图

Fig. 7 High adhesion lateral error diagram

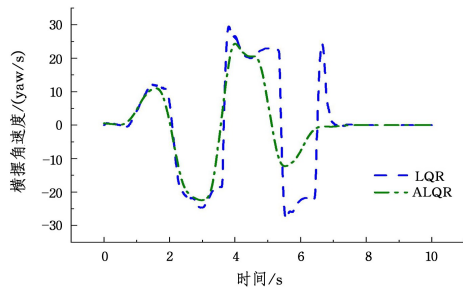


图 8 高附着横摆角速度图

Fig. 8 High attachment yaw rate diagram

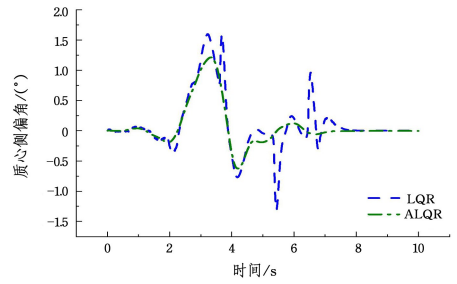


图 9 高附着质心侧偏角图

Fig. 9 Sideslip angle diagram of high attachment centroid

4.2 低附着实验工况

设置路面附着系数为 0.4,车辆速度为 54 km/h,图 10、图 11 分别为跟踪效果及横向误差图。在第二次变道即将完成时,LQR 控制器发生失稳现象,无法跟踪到目标路径,而 ALQR 控制器可较平稳地完成跟踪过程,最大横向误差为 0.09 m。由此可见,ALQR 控制器的跟踪精度更高。图 12、图 13 展示了路径跟踪过程中横摆角速度及质心侧偏角的变化特性,ALQR 在变道完成时横摆角速度及质心侧偏角收敛速度更快,而 LQR 则无法收敛,此时车辆处于不稳定状态。由此可见,ALQR 控制器的稳定性更好。

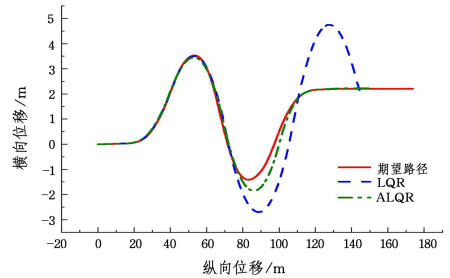


图 10 低附着路径跟踪效果图

Fig. 10 Low attachment path tracking renderings

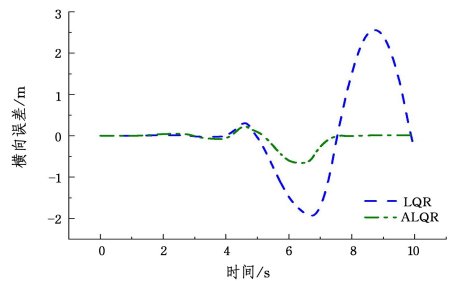


图 11 低附着横向误差图

Fig. 11 Low adhesion lateral error diagram

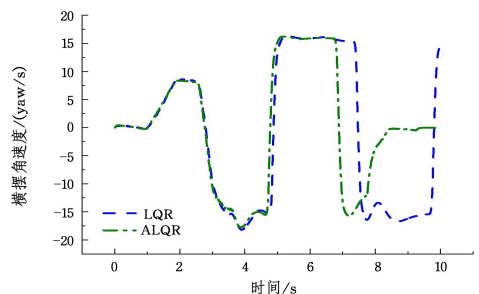


图 12 低附着横摆角速度图

Fig. 12 Low-attachment yaw rate diagram

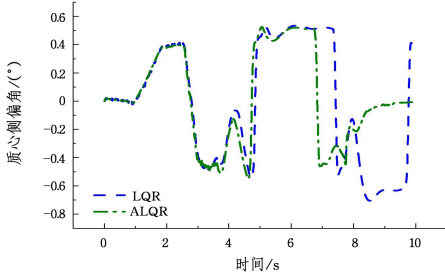


图 13 低附着质心侧偏角图

Fig. 13 Sideslip angle diagram of low attachment centroid

4.3 仿真实验总结

在第一次变道时,此时车辆前轮转角变化较小,轮胎处于线性区,故 LQR 与 ALQR 在跟踪精度及稳定性上大致相同。随着车辆进行第二次变道,前轮转角变化变大,轮胎处于非线性区域,此时线性侧偏刚度已无法满足 LQR 控制器的要求,车辆出现较大的横向误差甚至发生失稳现象。而 ALQR 由于考虑了轮胎侧偏刚度的动态特性,能计算输出更优的前轮转角,从而较好地完成路径跟踪过程。由上述实验结果及分析可知,ALQR 在高、低附着系数两种工况下跟踪精度及稳定性均优于 LQR。

5 硬件在环仿真实验验证

为进一步验证本文所设计 ALQR 控制器的有效性及适用性,考虑到车辆非线性状态下的实车实验危险系数较高,故开展了硬件在环仿真实验,以进一步验证 ALQR 控制器的

性能。仿真流程如图 14 所示,主要由电脑(上位机)、CAN 卡,电机控制器及转向电机等组成。

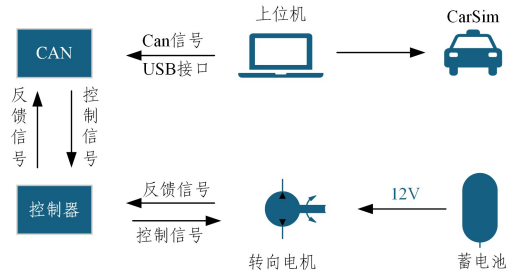


图 14 硬件在环仿真流程图

Fig. 14 Flow chart of hardware-in-the-loop simulation

为更好地展现 ALQR 控制器的适用性,实验工况设置采取与仿真实验相同的设置,以进一步验证控制器性能。

图 15(a)一 图 15(c)分别为高路面附着系数下硬件在环实验的路径跟踪、横摆角速度、质心侧偏角效果图。图 15(d)一 图 15(f)分别为低路面附着系数下硬件在环实验的路径跟踪、横摆角速度、质心侧偏角效果图。

由实验结果可知:在高、低两种路面附着系数条件下,ALQR 控制器均可较好地完成路径跟踪过程,横向误差更小,收敛速度更快,展现出 ALQR 控制器在跟踪精度及稳定性方面较 LQR 控制器的优越性能,从而验证了本文所提控制器中考虑轮胎侧偏刚度时变特性的重要性。实验结果验证了本文所设计的 ALQR 控制器在真实环境下的有效性及适用性,可为智能车辆路径跟踪控制器设计提供一定的理论基础。

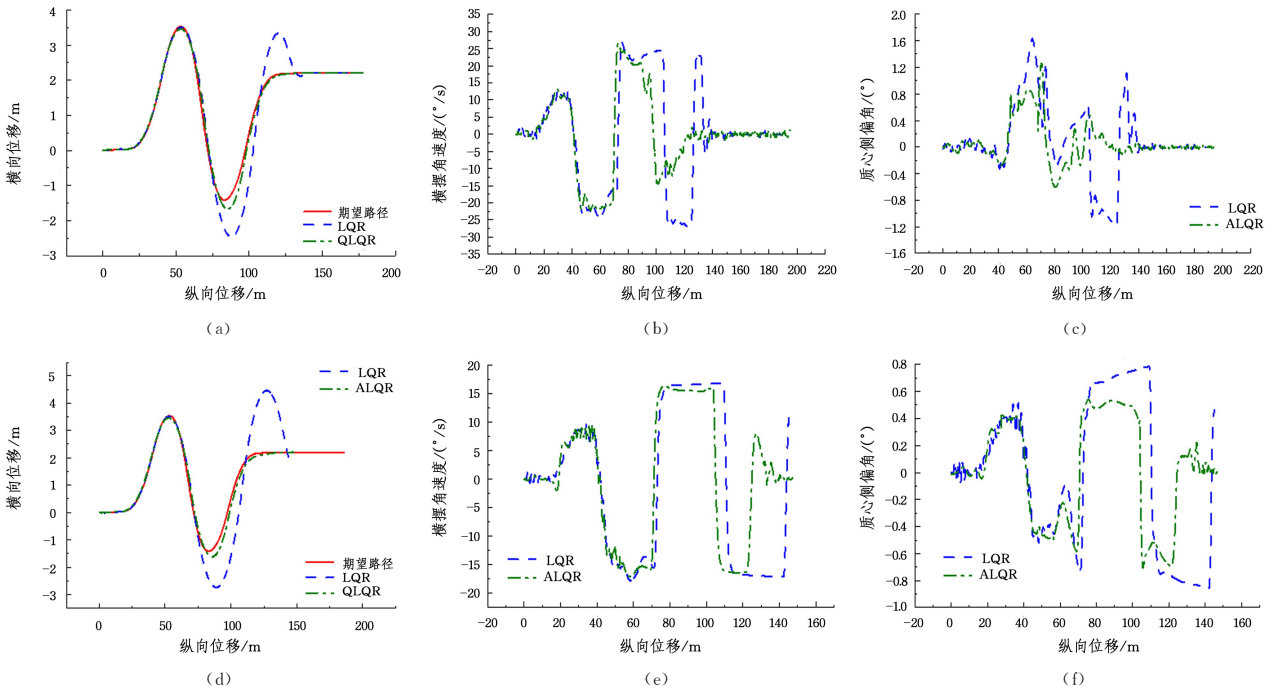


图 15 硬件在环仿真实验图

Fig. 15 Hardware-in-the-loop simulation experiment diagram

结束语 本文考虑高斯白噪声下集员滤波估计可能出现真实值超出噪声边界的情况,引入渐消因子,依据残差序列进一步预测椭圆形矩阵并进行实时校正,完成对集员滤波

算法的改进,并基于此设计了轮胎侧向力估计器。仿真实验证明,所设计的侧向力估计器估计性能较好,精度较高。

基于二自由度横向误差模型及 LQR 理论设计了智能

车辆路径跟踪控制器,考虑轮胎侧偏刚度的时变特性,基于估计的轮胎侧向力设计了自适应轮胎侧偏刚度更新准则,替换 LQR 控制器中线性侧偏刚度,完成 ALQR 控制器设计。

开展了基于 CarSim 及 Simulink 的联合仿真及硬件在环实验。实验结果表明,ALQR 控制器在高、低两种路面附着系数条件下的跟踪精度及稳定性均优于 LQR 控制器。跟踪精度平均提高 65.867%,尤其在低附路面,LQR 控制器忽略轮胎刚度变化引发的循迹,性能显著下降,而 ALQR 控制器可通过轮胎侧偏刚度实时求解最优前轮转角,保证车辆循迹精度与稳定性。

参 考 文 献

- [1] Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's automotive engineering research progress;2023[J]. China Journal of Highway and Transport,2023,36(11):1-192.
- [2] CHENG S, CHEN H, WANG Z, et al. A game theoretical chassis domain approach to trajectory tracking for automated vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(11):14051-14060.
- [3] WU J, ZHANG J, NIE B, et al. Adaptive control of pmsm servo system for steering-by-wire system with disturbances observation[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(2):2015-2028.
- [4] SUN Z Z, LIU Y, ZHANG L C. Predictor and eso-based adaptive tracking control of heterogeneous vehicle platoon[J]. Science China Technological Sciences, 2024, 67(9):2842-2852.
- [5] CAO L L, LIU W, DAI K P, et al. Path tracking control of autonomous container trucks using angular compensation LQR [J]. Automotive Safety and Energy, 2024, 15(3):413-423.
- [6] LI K, LI Y. Fuzzy adaptive optimization prescribed performance control for nonlinear vehicle platoon[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2024, 32(2):360-372.
- [7] ZOU S, ZHAO W, WANG C. Tracking and synchronization control strategy of vehicle dual-motor steer-by-wire system via super-twisting SOSMC and MDCS[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2023, 183:109638.
- [8] WANG Z, LING Y, MA M. A deep learning optimized LQR method for enhanced formation control with embedded systems [J]. Engineering Research Express, 2024, 6:025203.
- [9] MOKBEL E F F, ABD-EL-TAWWAB A M, MOURAD M, et al. Improving Handling Performance of a Four-Wheel Steering Vehicles Using LQR Controller[J]. Journal of Advanced Engineering Trends, 2024, 43(2):509-516.
- [10] ROKONUZZAMAN M, MOHAJER N, NAHAVANDI S. Effective adoption of vehicle models for autonomous vehicle path tracking: a switched MPC approach[J]. Vehicle System Dynamics, 2023, 61(5):1236-1259.
- [11] CHEN R, CHEN Z, DUAN Y, et al. Coupled longitudinal and lateral control for trajectory tracking of autonomous vehicle based on LTV-MPC approach[C]// WCX SAE World Congress Experience. 2022.
- [12] 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, 43.
- [13] XU S, PENG H. Design, analysis, and experiments of preview path tracking control for autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(1):48-58.
- [14] YANG T, BAI Z, LI Z, et al. Intelligent vehicle lateral control method based on feedforward + predictive LQR algorithm[J]. Actuators, 2021, 10(9):228.
- [15] HUANG C X, LEI F, HU L, et al. Lateral Stability Control Based on Regional Pole Placement of In-wheel-motored Electric Vehicle[J]. Automotive Engineering, 2019, 41(8):905-914.
- [16] CHEN J H, XU Z M, ZHANG Z F. Suspension State Estimation Based on Wheelbase Preview at Variable Speed[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(6):1040-1049.
- [17] FU Y S, LI S H, WANG G Y. State Estimation of Intelligent Electric Vehicle Considering Online Updating of Tire Cornering Stiffness[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2024, 43(1):150-158.
- [18] LIANG Y X, LI Y N, AMIR K, et al. Path following control of intelligent vehicles based on multi-model adaptive method[J]. Journal of Chongqing University, 2024, 47(3):1-15.
- [19] SUN X Q, WANG Y L, HU W W, et al. Research on Estimation Strategy of Vehicle Driving State Based on Tire Piecewise Affine Identification Model[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(7):1212-1221.
- [20] LU T, WU X J. Identification of cornering stiffness and research on simplified vehicle models[J]. China Measurement & Test, 2023, 49(5):97-107.
- [21] LI J Y, WANG Z, LU R, et al. A component-based coding-decoding approach to set-membership filtering for time-varying systems under constrained bit rate [J]. Automatica, 2023, 152:110874.
- [22] LI Z Y, LI X R. Lateral and Longitudinal Control of Intelligent Vehicle Based on Adaptive LQR[J]. Practical Automotive Technology, 2023, 48(2):101-107.
- [23] SUN F X, SHAO J J, SHAN S F, et al. Feedforward-Predictive LQR Lateral Control for Adapting to Variable Road Curvature [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2024, 38(2):45-54.
- [24] WU H, ZHU H, LI X, et al. Trust-based distributed set-membership filtering for target tracking under network attacks[J]. IEEE Access, 2023, 11:84468-84474.
- [25] GUI Y S, CHEN J M, HU K. Set-membership filtering based remote monitoring of an unmanned surface vessel[J]. Marine electronics, 2021, 41(12):13-16.
- [26] LONG Y Z, WEI T, FENG J, et al. Estimation of Adaptive Ro-

bust Unscented Particle Filter State for Four-wheel Driving EV [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(2):31-37.

[27] LUO Y T, ZHOU T Y, XU X T. Time-Varying LQR Control of Four-Wheel Steer /Drive Vehicle Based on Genetic Algorithm [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(3):114-122.

[28] GAO S, WANG Y Q, WANG Y H, et al. Longitudinal and lateral integrated feedback linearization control for intelligent vehicle [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(3):735-745.

[29] SUN Z, WANG R C, YE Q, et al. Investigation of Intelligent Vehicle Path Tracking Based on Longitudinal and Lateral Coordinated Control [J]. IEEE Access, 2020, 8:105031-105046.



ZHANG Yajuan, born in 1979, master, associate professor. Her main research interests include vehicle self-control and intelligent hardware control.



FENG Lingxia, born in 1978, master, associate professor. Her main research interests include computer application and intelligent hardware control.

(责任编辑:喻黎)

2025 下半年 CCF 走进高校 (CCF@U) 活动及讲者征集

现代社会处于高速发展时期,职场竞争异常激烈,学生在大学阶段应该学什么、具备怎样的知识结构、提升哪方面的能力,能够在走向社会后具有竞争力,不为毕业就业和未来的前途担忧,为社会和家庭创造价值?这不仅是大多数大学生和家长的困惑,也是 CCF 一直在关注和关心的问题。

CCF 走进高校 (CCF@U) 公益活动邀请学会资深专家走进校园为学生及青年教师做专业报告,帮助他们了解最新前沿技术,开阔视野,对他们的职业规划进行指导。CCF@U 活动已经成为 CCF 的一个品牌活动,目前已经成功举办逾 1300 场。

为了让更多的高校学生能够听到专家专业的演讲,更多的专业人士为学生们的成长提供指导,现公开征询 2025 下半年活动及讲者申请。已设有计算机专业的院校,有意愿贡献自己专业知识的业内人士,均可扫描下列二维码填写表格向本学会提出申请。



(活动申请)



(讲者申请)

据 CCF 微信公众号