

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.09.005

考虑复杂扰动的轻型商用车路径跟踪混合控制方法*

胡杰^{1,2,3}, 张志凌^{1,2,3}, 钟杰锋^{1,2,3}, 赵文龙^{1,2,3}, 郑嘉辰^{1,2,3}, 周思龙^{1,2,3}, 屈紫君⁴

(1. 武汉理工大学, 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 武汉 430070;

2. 武汉理工大学, 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 武汉 430070;

3. 新能源与智能网联车湖北工程技术研究中心, 武汉 430070;

4. 东风汽车股份有限公司商品研发院, 武汉 430000)

[摘要] 外界扰动、模型不确定性和参数摄动等复杂扰动直接影响智能车辆路径跟踪控制的精度和行驶安全性。商用车的载重特性使其在行驶过程中受到的复杂扰动更为明显, 为提升自动驾驶商用车路径跟踪精度和平顺性, 提出一种路径跟踪混合控制方法。首先, 建立鲁棒性强的基于扩张观测器的滑模控制器和变化平稳的增量式LQR控制器, 其中增量式LQR的参数使用粒子群算法整定。然后, 使用模糊控制器将两者相结合, 根据车速和横向误差调整权重系数, 在提升系统鲁棒性的同时削弱抖振。最后, 进行了仿真分析和实车试验。试验数据表明, SMC+LQR具备较好的控制效果, 能应对外界的复杂扰动。

关键词: 路径跟踪; 复杂扰动; 滑模控制; 扩张观测器; 增量式LQR; 模糊算法

A Hybrid Control Strategy for Light Commercial Vehicle Path Tracking Considering Complex Disturbances

Hu Jie^{1,2,3}, Zhang Zhiling^{1,2,3}, Zhong Jiefeng^{1,2,3}, Zhao Wenlong^{1,2,3}, Zheng Jiachen^{1,2,3},
Zhou Silong^{1,2,3} & Qu Zijun⁴

1. Wuhan University of Technology, Hubei Key Laboratory of Modern Auto Parts Technology, Wuhan 430070;

2. Wuhan University of Technology, Auto Parts Technology Hubei Collaborative Innovation Center, Wuhan 430070;

3. Hubei Technology Research Center of New Energy and Intelligent Connected Vehicle Engineering, Wuhan 430070;

4. Commercial Product R&D Institute, Dongfeng Automobile Co., Ltd., Wuhan 430000

[Abstract] Complex disturbances such as external interference, model uncertainty and parameter perturbation directly affect the accuracy and driving safety of intelligent vehicle path tracking control. Commercial vehicles are more susceptible to complex disturbances during driving because of their load characteristics. A hybrid path tracking control method is proposed in order to improve the accuracy and smoothness of commercial vehicle path tracking. Firstly, a robust sliding mode controller based on extended observer and an incremental LQR controller with stable changes are established. Particle swarm optimization algorithm is used to tune the parameters of the incremental LQR. Then, in order to improve robustness while weakening chattering, a fuzzy controller is used to adjust weight coefficient between them according to vehicle speed and lateral error. Finally, simulation analysis and vehicle experiments are conducted. The experimental data shows that SMC+LQR has good control performance to cope with complex external disturbances.

Keywords: path tracking; complex disturbances; sliding mode control; extended state observer; incremental LQR; fuzzy algorithm

* 湖北省科技重大专项(2022AAA001)和湖北省重大攻关项目(JD)(2023BAA017)资助。

原稿收到日期为2024年03月16日, 修改稿收到日期为2024年04月20日。

通信作者: 胡杰, 教授, 博士, E-mail: auto_hj@163.com。

前言

随着工业 4.0 的到来,信息化正促进着产业变革,智能汽车成为汽车行业的发展趋势。在《智能网联汽车技术路线图 2.0》中指出,我国计划在 2035 年全面建立智能网联汽车技术和产业体系。运动控制是智能汽车的一项关键技术,是现阶段的研究热点^[1]。汽车在行驶过程中,横向运动和纵向运动互相耦合,使轨迹跟踪控制的实现具有较大挑战。为降低建模难度,部分学者将车辆的横向运动和纵向运动解耦,在研究横向运动时,假定车辆纵向速度为定值,将轨迹跟踪控制问题简化为路径跟踪控制问题^[2]。

现有的典型路径跟踪控制算法分为无模型算法和有模型算法^[3]。无模型算法无须建立被控对象的数学模型。传统算法中的 PID 控制结构简单,但是对参数的依赖性过强,且鲁棒性不足^[4]。近年来兴起的强化学习算法无须建立模型,但对数据量的要求和系统算力的要求较高^[5]。

有模型的算法分为运动学模型和动力学模型两类,其中运动学模型适用于泊车工况,动力学模型适用于行车工况^[6]。运动学模型将车身视作刚体,忽略轮胎变形和横纵向受力等多方面影响,主要有纯跟踪算法^[7]和 Stanley 算法^[8],其缺陷在于无法准确反映车辆的动态特性,仅适用于低速简单工况,无法满足高速工况下的车辆稳定性需求。基于动力学模型的控制算法主要有 LQR 控制^[9-11]、线性模型预测控制(LMPC)^[12]和非线性模型预测控制(NMPC)^[13]等。LQR 控制通过对模型迭代求解获取相应控制量,具备良好的跟踪效果,但缺乏抵抗不确定性扰动的能力,鲁棒性不足。NMPC 建模精度更高,滚动优化和反馈矫正机制使其具备一定鲁棒性,但需要在单位执行周期内求解非线性优化问题,导致计算实时性不足。LMPC 具备更高的实时性,但需要对模型线性化处理,精确性低于 NMPC^[13]。

本文研究对象为商用车,商用车的载重特性使其质量和质心位置存在较大波动,行驶过程中模型不确定性和参数摄动现象更为明显。商用车的质心较乘用车更高,更易受到路面不平、侧向风等外界扰动的影响。可见,复杂扰动对商用车路径跟踪的负面影响较大。然而,上述动力学控制算法没有考虑外界扰动、模型不确定性和参数摄动等问题,难以应对复杂扰动。

为提升系统鲁棒性,很多学者将鲁棒控制^[14]和滑模可变结构控制(SMC)^[15-19]应用于路径跟踪控制。鲁棒控制的鲁棒性强,但过高的运算阶数和对硬件性能的依赖限制了其应用,SMC 对硬件性能的依赖则相对较小^[15]。文献[16]中基于灰狼优化算法建立自适应滑模控制器,使控制器具备更高的响应精度和更快的收敛速度。文献[17]和文献[18]中将反步法与滑模控制相结合,增强了控制器对模型不确定性的鲁棒性,在低附着路面上的效果尤为显著。然而,上述算法未对外界扰动建立观测模型,无法有针对性地对外界扰动作出响应。文献[19]中引入自适应反馈,通过反馈增益的自适应减小系统的不确定性,但是仅在固定车速上得到验证。另一方面,滑模控制容易在滑模面附近出现抖振现象,对路径跟踪的平顺性造成影响^[15]。

针对传统算法不足以应对外界复杂扰动问题,通过模糊控制器,将实时性强、不易发生抖振的增量式 LQR 控制和鲁棒性强的基于扩张观测器的滑模控制相结合,在提升系统鲁棒性的同时削弱系统抖振,并使用粒子群算法整定增量式 LQR 的参数。通过 TruckSim/Simulink 联合仿真在双移线工况下验证算法有效性,在复杂曲率路径下进行实车试验,验证该控制方法的优越性和有效性。

1 误差模型建立

1.1 2 自由度车辆模型

智能汽车整车动力学建模方法众多,其中线性 2 自由度模型结构简单,可以准确反映车辆的侧向运动和横摆运动^[20]。假设车辆纵向速度为定值,只考虑车辆沿着 y 轴方向的平动和绕着 z 轴的转动,忽略车辆的侧倾运动,构建车辆动力学模型如图 1 所示。利用线性轮胎模型建立侧偏角和侧向力之间的关系为

$$\begin{cases} F_{yf} = k_f \alpha_1 \\ F_{yr} = k_r \alpha_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: k_f, k_r 分别为前轴和后轴的总侧偏刚度($k < 0$, 双轮); α_1, α_2 分别为两个前轮和两个后轮的平均侧偏角。利用运动学理论建立侧偏角与速度之间的关系为

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{v_y + a\omega_r}{v_x} - \delta \\ \alpha_2 = \frac{v_y - b\omega_r}{v_x} \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_x, v_y 分别为质心的纵向速度和横向速度; ω_r 为横摆角速度; a, b 分别为质心到前轴和后轴的距离; δ 为前轮转角。

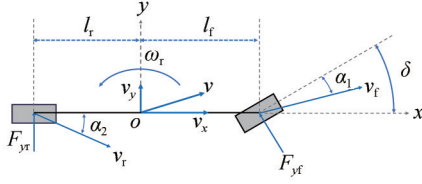


图1 动力学模型示意图

由式(1)、式(2)和牛顿第二定律,可得到动力学方程为

$$\begin{cases} \dot{v}_y = \frac{k_f + k_r}{mv_x} v_y + \left(\frac{ak_f - bk_r}{mv_x} - v_x \right) \omega_r - \frac{k_f}{m} \delta \\ \dot{\omega}_r = \frac{ak_f - bk_r}{I_z v_x} v_y + \frac{a^2 k_f + b^2 k_r}{I_z v_x} \omega_r - \frac{ak_f}{I_z} \delta \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_z 为车辆绕z轴的转动惯量; m 为整车质量。

1.2 路径跟踪误差模型

在智能车辆进行路径跟踪的过程中,横向误差和方向误差为两个重要指标。为了直观地体现两者,将上述2自由度模型转换为动力学误差模型。车辆在行驶过程中,转向系统的响应存在延迟。针对执行器延迟导致的滞后和超调问题,建立基于预瞄的动力学模型,以削弱执行器延迟导致的滞后和超调,示意图如图2所示。预瞄方程为

$$\begin{cases} l_{pre} = v_x t_{pre} \\ x_{pre} = x + l_{pre} \cos \varphi \\ y_{pre} = y + l_{pre} \sin \varphi \end{cases} \quad (4)$$

式中: l_{pre} 为预瞄距离; t_{pre} 为预瞄时间; φ 为车辆横摆角; (x, y) 为车辆定位点; (x_{pre}, y_{pre}) 为车辆预瞄点。

定义横向误差 e_d 为车辆预瞄点到期望路径的最小横向距离,航向误差 e_φ 为车辆航向角与期望值之

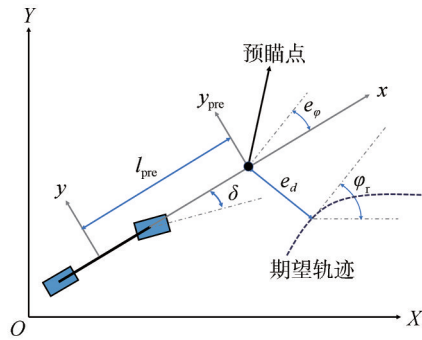


图2 路径跟踪误差示意图

差。根据运动学理论:

$$\begin{cases} \dot{e}_d = v_x \sin e_\varphi + v_y \cos e_\varphi \\ e_\varphi = \varphi - \varphi_{ref} \end{cases} \quad (5)$$

式中 φ_{ref} 为期望的航向角。

当航向误差较小时,根据等价无穷小理论,有

$$\begin{cases} \sin e_\varphi \approx e_\varphi \\ \cos e_\varphi \approx 1 \end{cases} \quad (6)$$

根据几何学关系,有

$$\dot{\varphi}_{ref} = v_x \kappa \quad (7)$$

式中 κ 为道路曲率。

对式(5)化简并求导,可得误差变化率为

$$\begin{cases} \dot{e}_d = \dot{v}_x e_\varphi + v_x \dot{e}_\varphi + \dot{v}_y \\ \dot{e}_\varphi = \dot{\omega}_r - \dot{v}_x \kappa - v_x \dot{\kappa} \end{cases} \quad (8)$$

为降低模型的复杂程度,忽略速度变化率和曲率变化率:

$$\begin{cases} \dot{v}_x = 0 \\ \dot{\kappa} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

联立式(3)和式(8)并加入扰动量,化简后得到误差模型为

$$\begin{cases} \ddot{e}_d = \frac{k_f + k_r}{mv_x} \dot{e}_d + \frac{ak_f - bk_r}{mv_x} \dot{e}_\varphi - \frac{k_f + k_r}{m} e_\varphi - \frac{k_f}{m} \delta + \left(\frac{ak_f - bk_r}{m} - v_x^2 \right) \kappa + d_1 \\ \ddot{e}_\varphi = \frac{ak_f - bk_r}{I_z v_x} \dot{e}_d + \frac{a^2 k_f + b^2 k_r}{I_z v_x} \dot{e}_\varphi - \frac{ak_f}{I_z} \delta - \frac{ak_f - bk_r}{I_z} e_\varphi + \frac{a^2 k_f + b^2 k_r}{I_z} \kappa + d_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中 d_1 和 d_2 分别为横向误差和航向误差的扰动量。

将式(10)化简,得到状态空间方程为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{C}\kappa + \mathbf{D} \quad (11)$$

其中:状态向量 $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} e_d \\ \dot{e}_d \\ e_\varphi \\ \dot{e}_\varphi \end{bmatrix}$; $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ d_1 \\ 0 \\ d_2 \end{bmatrix}$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_f + k_r}{mv_x} & \frac{ak_f - bk_r}{m} & \frac{ak_f - bk_r}{mv_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{ak_f - bk_r}{I_z v_x} & \frac{a^2 k_f + b^2 k_r}{I_z} & \frac{ak_f - bk_r}{I_z v_x} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{k_f}{m} \\ 0 \\ -\frac{ak_f}{I_z} \end{bmatrix}; \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{ak_f - bk_r}{m} - v_x^2 \\ 0 \\ \frac{a^2 k_f + b^2 k_r}{I_z} \end{bmatrix}$$

2 路径跟踪控制器设计

上述动力学模型可以体现车辆动力学特性,但无法应对复杂扰动。商用车的载重特性使其质量和质心位置存在较大波动,模型不确定性程度较高,行驶过程中存在明显的参数摄动现象。路面不平和侧向风等外界扰动也对模型的控制效果存在负面影响。针对上述问题,即外界扰动、模型不确定性和参数摄动等问题,引入基于扩张观测器的滑模控制和增量式LQR控制两种算法,使用模糊控制器对两者进行加权切换,由此在提升系统鲁棒性的同时削弱抖振。跟踪控制器的结构如图3所示,系统的输入为定位信息、底盘信息和规划轨迹,通过误差模型计算出横向误差和航向误差后,求解输出转角,交由线控底盘执行。

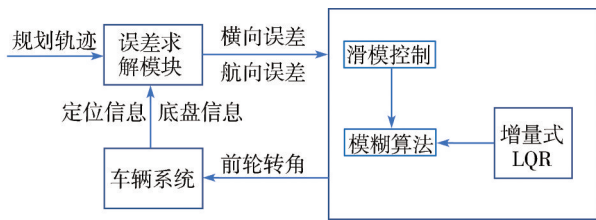


图3 控制系统结构图

2.1 基于扩张观测器的滑模控制器

2.1.1 扩张观测器设计

车辆在行驶过程中,路面不平和侧向风等各种外界扰动会对路径跟踪的精度造成影响。在状态方程中加入扰动量,使用扩张状态观测器观测系统受到的外界扰动。扩张状态方程为

$$\dot{\mathbf{x}}_E = \mathbf{A}_E \mathbf{x}_E + \mathbf{B}_E u + \mathbf{C}_E \boldsymbol{\kappa} + \mathbf{D}_E \quad (12)$$

$$\text{其中: } \mathbf{x}_E = \begin{bmatrix} x \\ d_1 \\ d_2 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_E = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{O}_{2 \times 1} \end{bmatrix}; \mathbf{C}_E = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{O}_{2 \times 1} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}_E = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{4 \times 1} \\ \dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix}; \mathbf{A}_E = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{T} \\ \mathbf{O}_{2 \times 4} & \mathbf{O}_{2 \times 2} \end{bmatrix}; \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{记估计向量为 } \hat{\mathbf{x}}_E = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{d}_1 \\ \hat{d}_2 \end{bmatrix}, \text{估计方程为}$$

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}_E = \mathbf{A}_E \hat{\mathbf{x}}_E + \mathbf{B}_E u + \mathbf{C}_E \boldsymbol{\kappa} + \boldsymbol{\Delta} \quad (13)$$

式中: \hat{x} 、 \hat{d}_1 、 \hat{d}_2 为对应变量的估计值; $\boldsymbol{\Delta}$ 为观测模型的

观测误差。根据文献[21],有

$$\boldsymbol{\Delta} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \varepsilon_d \\ \alpha_2 \text{fal}(\varepsilon_d, 0.5, 0.1) \\ \alpha_1 \varepsilon_\varphi \\ \alpha_2 \text{fal}(\varepsilon_\varphi, 0.5, 0.1) \\ \alpha_3 \text{fal}(\varepsilon_d, 0.25, 0.1) \\ \alpha_3 \text{fal}(\varepsilon_\varphi, 0.25, 0.1) \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: α_1 、 α_2 、 α_3 为增益系数;横向观测误差 $\varepsilon_d = e_d - \hat{e}_d$;航向观测误差 $\varepsilon_\varphi = e_\varphi - \hat{e}_\varphi$;观测误差函数为

$$\text{fal}(\varepsilon, a, b) = \begin{cases} \frac{\varepsilon}{b^{1-a}}, & |\varepsilon| \leq b \\ |\text{sign}(\varepsilon)| |\varepsilon|^a, & |\varepsilon| > b \end{cases} \quad (15)$$

通过式(13)和式(14)即可求解出外界扰动的观测值 \hat{d}_1 和 \hat{d}_2 。

2.1.2 模型建立

滑模控制具备良好的鲁棒性,可以抵抗外界扰动、参数摄动和模型不确定性的影响。将综合误差记为

$$e = t_d e_d + t_\varphi e_\varphi \quad (16)$$

式中 t_d 、 t_φ 分别为横向误差和航向误差的权重系数。取滑模面为

$$s = k_p e + k_d \dot{e} \quad (17)$$

式中 k_p 、 k_d 分别为比例项和微分项的权重系数。假定扩张观测器满足 $\hat{d}_1 = d_1$ 、 $\hat{d}_2 = d_2$,选取输入 $u = \delta$,由式(16)和式(17)可将式(10)化为

$$\begin{cases} \dot{e} = \frac{1}{k_d} (s - k_p e) \\ \dot{s} = \frac{k_p}{k_d} (s - k_p e) + k_d (f_1 + f_2 u + t_d d_1 + t_\varphi d_2) \end{cases} \quad (18)$$

其中:

$$f_1 = t_d \left(\frac{k_f + k_r}{m v_x} \dot{e}_d + \frac{a k_f - b k_r}{m v_x} \dot{e}_\varphi - \frac{k_f + k_r}{m} e_\varphi + \frac{a k_f - b k_r}{m} \boldsymbol{\kappa} - v_x^2 \boldsymbol{\kappa} \right) +$$

$$t_\varphi \left(\frac{a k_f - b k_r}{I_z v_x} \dot{e}_d + \frac{a^2 k_f + b^2 k_r}{I_z v_x} \dot{e}_\varphi - \frac{a k_f - b k_r}{I_z} e_\varphi + \frac{a^2 k_f + b^2 k_r}{I_z} \boldsymbol{\kappa} \right)$$

$$f_2 = -t_d \frac{k_f}{m} - t_\varphi \frac{a k_f}{I_z}$$

选取中间变量为

$$\begin{cases} G = \frac{1}{k_d f_2} \\ H = -\frac{k_p}{k_d^2 f_2} \\ \omega = \frac{f_1}{f_2} - \frac{k_p^2}{k_d^2 f_2} e \end{cases} \quad (19)$$

则可将式(18)化简为

$$\dot{s} = f(x) + g(d) \quad (20)$$

其中: $g(d) = k_d(t_d d_1 + t_\varphi d_2)$

$$f(x) = \frac{1}{G}(-Hs + \omega + u)$$

2.1.3 控制律设计

选取基于扩张观测器的滑模控制律为 $u = -\omega - \gamma^2 s + Hs - Gg(d)$ 。其中, γ 为系统鲁棒性指标, 其值越大, 鲁棒性越强。以下证明该控制律满足系统的稳定性需求。

选取 Lyapunov 函数:

$$L = \frac{1}{2} s^T G s \quad (21)$$

显然, $L \geq 0$, 且

$$\dot{L} = s^T G \dot{s} + \frac{1}{2} s^T \dot{G} s =$$

$$s^T(-Hs + \omega + u + Gg(d)) + \frac{1}{2} s^T \dot{G} s = -\gamma^2 s^T s \leq 0$$

当 $s \neq 0$ 时, 恒有 $L > 0, \dot{L} < 0$ 。当 $s = 0$ 时, 恒有 $\dot{L} = 0$ 。根据 Lyapunov 稳定判据, 该控制律可以使系统趋于稳定。

滑模控制器的输出转角为

$$\delta_{SMC} = -\omega - \gamma^2 s + Hs - Gg(d) \quad (22)$$

2.2 增量式 LQR 控制器

2.2.1 求解模型建立

对式(11), 忽略曲率 κ 和外界扰动 D 对系统的影响, 取 $u = \delta$, 得到简化的状态空间模型为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \quad (23)$$

将上述状态空间方程离散化, 对矩阵 \mathbf{A} 使用中点欧拉法, 对矩阵 \mathbf{B} 使用向前欧拉法, 选取时间步长为 t , 得到离散的状态空间方程为

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d u(k) \quad (24)$$

式中: $\mathbf{A}_d = \left(I - \frac{At}{2}\right)^{-1} \left(I + \frac{At}{2}\right)$; $\mathbf{B}_d = \mathbf{B}t$; $\mathbf{x}(k)$ 为 k 时刻的状态向量; $u(k)$ 为 k 时刻的前轮转角。

为进一步削弱转角抖动, 限制转角变化, 在状态向量中加入前轮转角, 将前轮转角变化量作为系统输入, 建立增量式模型为

$$\xi(k+1) = \mathbf{A}_e \xi(k) + \mathbf{B}_e \Delta u(k) \quad (25)$$

式中: $\xi(k+1) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k+1) \\ \mathbf{u}(k) \end{bmatrix}$; $\mathbf{A}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & \mathbf{B}_d \\ \mathbf{O}_{1 \times 4} & 1 \end{bmatrix}$; $\mathbf{B}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_d \\ 1 \end{bmatrix}$; $\Delta u(k)$ 为 k 时刻的前轮转角变化量。

设计代价函数时, 选取状态量和控制量的权重矩阵为 \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} , 定权重矩阵受较远时域的影响较大。考虑控制效果的衰减性, 引入衰减系数 β , 降低较远控制时域的权重^[22]。则代价函数为

$$J(x) = \sum_{k=0}^{\infty} (\xi(k)^T e^{-\beta k} \mathbf{Q} e^{-\beta k} \xi(k) + \Delta u(k)^T e^{-\beta k} \mathbf{R} e^{-\beta k} \Delta u(k)) \quad (26)$$

2.2.2 最优求解

LQR 求解问题可转化为如下最优化问题

$$\begin{cases} \min J(x) = \sum_{k=0}^{\infty} (\xi_2(k)^T \mathbf{Q} \xi_2(k) + \Delta u_2(k)^T \mathbf{R} \Delta u_2(k)) \\ \text{s. t. } \xi_2(k+1) = \mathbf{A}_2 \xi_2(k) + \mathbf{B}_2 \Delta u_2(k) \end{cases} \quad (27)$$

其中:

$$\begin{cases} \xi_2(k) = e^{-\beta k} \xi(k) \\ \Delta u_2(k) = e^{-\beta k} \Delta u(k) \\ \mathbf{A}_2 = e^{-\beta} \mathbf{A}_e \\ \mathbf{B}_2 = e^{-\beta} \mathbf{B}_e \end{cases} \quad (28)$$

通过拉格朗日乘数法, 即可求得上述问题的最优解, 其中反馈矩阵为

$$\mathbf{K} = (\mathbf{R} + \mathbf{B}_2^T \mathbf{P} \mathbf{B}_2)^{-1} \mathbf{B}_2^T \mathbf{P} \mathbf{A}_2 \quad (29)$$

根据黎卡提方程

$$\mathbf{P}_k = -\mathbf{A}_2^T \mathbf{P}_{k+1} \mathbf{B}_2 (\mathbf{R} + \mathbf{B}_2^T \mathbf{P}_{k+1} \mathbf{B}_2)^{-1} \mathbf{B}_2^T \mathbf{P}_{k+1} \mathbf{A}_2 + \mathbf{A}_2^T \mathbf{P}_{k+1} \mathbf{A}_2 + \mathbf{Q} \quad (30)$$

$$\mathbf{P}_\infty = \mathbf{Q} \quad (31)$$

式中 \mathbf{P}_k 为 k 时刻的矩阵 \mathbf{P} , 可通过迭代求解得到。

LQR 控制的输出转角为

$$u(k) = u(k-1) - \mathbf{K} \xi(k) \quad (32)$$

2.2.3 QR 参数整定

QR 参数的选取与 LQR 的控制效果存在很强的关联性, 记 $\mathbf{Q} = \text{diag}(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5)$, $\mathbf{R} = [r]$ 。控制器的控制指标为横向误差和航向误差, 故忽略两者变化率的影响, 将 \dot{e}_d 和 \dot{e}_φ 的权重系数置零, 即 $q_2 = q_4 = 0$ 。 q_1, q_3, q_5, r 之间的大小关系决定着控制系统对横向误差、航向误差、前轮转角和前轮转角变化量的约束程度, 相对取值越大, 约束越强。将 r 取为定值 10, 使用粒子群算法整定参数 q_1, q_3, q_5 。粒子群算法的伪代码如表 1 所示。

表1 粒子群算法伪代码

```

输入:粒子数  $n$ 、迭代次数  $iter$ 、变量范围(lowest, biggest)、
      权重( $\omega, c_1, c_2$ )
输出:最优向量
-----
 $L_1 = \text{rand}(\text{lowest}, \text{biggest}), V_1 = \text{rand}(\text{lowest}, \text{biggest})$ 
 $r_1 = \text{rand}(0, 1), r_2 = \text{rand}(0, 1)$ 
for  $i = 1:iter$ 
for  $j = 1:n$ 
根据式(33)更新  $L_j$  和  $V_j$ 
计算  $fitness(j)$ 
end
 $now(i) = \min(fitness)$ 
 $global = \min(now)$ 
end
输出  $global$  的结果

```

表中: n 为粒子个数; $iter$ 为迭代次数; $lowest$ 和 $biggest$ 为对应参数的最小值和最大值。将各粒子的位置记为三维列向量 L_i ,速度记为三维列向量 V_i ,向量的3个维度分别对应参数 q_1, q_3, q_5 。粒子的集合即为粒子群,矩阵 $L = [L_1, L_2, \dots, L_n]$ 表示粒子群的位置,矩阵 $V = [V_1, V_2, \dots, V_n]$ 表示粒子群的速度。

根据粒子群算法,迭代等式为

$$\begin{cases} V_i = \omega V_{i-1} + c_1 r_1 (now - L_{i-1}) + c_2 r_2 (global - L_{i-1}) \\ L_i = L_{i-1} + V_i \end{cases} \quad (33)$$

式中: ω 和 c_1, c_2 为各部分对速度的影响权重; r_1, r_2 为介于0和1之间的随机数; now 和 $global$ 分别为当前最优位置向量和全局最优位置向量。

利用TruckSim与matlab联合仿真中的双移线工况整定参数,选取粒子数为20,迭代次数为20,适应度函数为

$$fitness = \int_0^{t_{end}} |e_d| + |e_\varphi| dt \quad (34)$$

式中 t_{end} 为仿真时长。求解过程中 $global$ 的变化如图4所示,得到最优参数为 $q_1 = 3, q_3 = 40, q_5 = 8$ 。

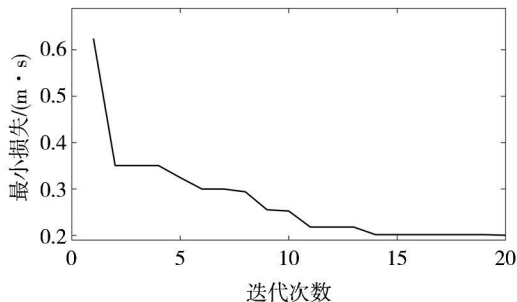


图4 迭代效果图

2.3 模糊控制器设计

2.3.1 总体设计

滑模控制的鲁棒性较强,但容易引发抖振。LQR控制不易引发抖振,但鲁棒性不足。利用模糊控制器实现两种算法之间的切换,可以将滑模控制和LQR控制的优势相结合。

设计控制系统输出的前轮转角为

$$\delta = \lambda_{LQR} \delta_{LQR} + (1 - \lambda_{LQR}) \delta_{SMC} \quad (35)$$

式中 λ_{LQR} 为增量式LQR控制对应的权重,满足 $0 \leq \lambda_{LQR} \leq 1$ 。

2.3.2 模糊规则设计

滑模控制在系统状态到达滑模面附近,即误差较小时,存在明显抖振。为削弱抖振,在误差较小时增大 λ_{LQR} ,使增量式LQR控制器发挥主要作用。仿真试验表明,在车速较小时,滑模控制易产生较大超调。为降低超调,在低速时增大 λ_{LQR} ,使增量式LQR控制器发挥主要作用。在高速时,为增强系统的鲁棒性,减小 λ_{LQR} ,使滑模控制器发挥主要作用。

定义的模糊规则如表2所示,输入为纵向车速 v_x 和横向误差绝对值 $|e_d|$,论域分别为 $[0, 80]$ 和 $[0, 1]$,模糊子集为{S(小), M(中), B(大)},隶属度函数为双边高斯型函数。输出为 λ_{LQR} ,论域为 $[0, 1]$,模糊子集为{VS(很小), S(小), B(大), VB(很大)},隶属度函数为三角形函数。

表2 模糊规则表

$ e_d $	v_x		
	S	M	B
S	VB	VB	B
M	VB	B	S
B	B	S	VS

3 仿真分析

为验证控制系统的控制效果,使用Simulink与TruckSim进行联合仿真,车辆动力学参数如表3所示。

3.1 算法对比仿真

为验证系统对外界扰动的鲁棒性,选用曲率变化复杂的双移线工况,道路选取为低附着湿滑路面,并设置车辆的初始横向误差为0.1 m。为验证系统对参数摄动的鲁棒性,将纵向速度设置为变量,使用双PID进行控制,仿真过程中逐渐从50 km/h加速到

表3 仿真分析车辆参数

参数	数值
质量 m/kg	2 600
绕 z 轴转动惯量 $I_z/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	4 245
质心到前轴的距离 a/m	1.35
质心到后轴的距离 b/m	3.05
前轴总侧偏刚度 $k_f/(\text{N}\cdot\text{rad}^{-1})$	-173 000
后轴总侧偏刚度 $k_r/(\text{N}\cdot\text{rad}^{-1})$	-173 000

70 km/h。相应的算法参数如表4所示,均为调试后的最优参数。控制系统的仿真结果对比图如图5所示。

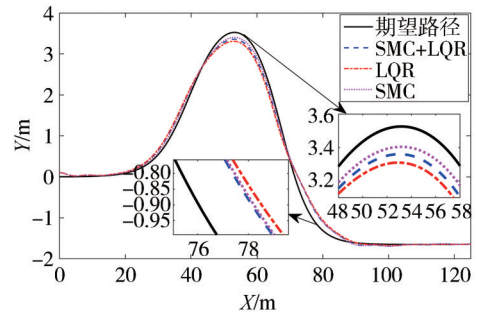
表4 算法参数

参数	数值
LQR 矩阵 Q, R	diag(3, 0, 40, 0, 8), 10
LQR 最大迭代步长	150
LQR 衰减系数 β	0.1
SMC 横向、航向误差权重 t_d, t_φ	(1, 0.1)
SMC 比例、微分项权重 k_p, k_d	(2.2, 0.2)
SMC 鲁棒性指标 γ	0.5
状态观测器参数 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	(3, 10, 6)

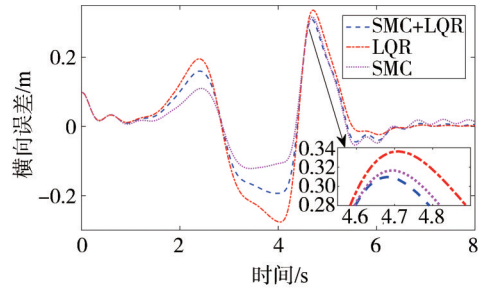
图5(a)描述了增量式LQR控制、滑模控制和SMC+LQR在双移线工况下的行驶轨迹。可以看出,滑模控制的跟踪速度最快,跟踪精度最高,但存在明显的抖振。增量式LQR控制最为平稳,但跟踪速度最慢,跟踪精度最低。SMC+LQR在跟踪速度和跟踪精度上与滑模控制没有明显差距,但抖振现象明显减弱。

图5(b)和图5(c)描述了3种算法在双移线工况下的横向误差和航向误差,对应统计学指标如表5所示,其中最大值没有考虑正负号。三者的最大横向误差均发生在4.7s时。滑模控制与SMC+LQR差距较小,两者均优于增量式LQR控制。

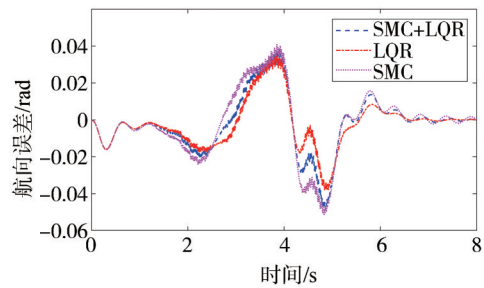
图5(d)描述了3种算法在双移线工况下的转向盘转角。可以看出,滑模控制的转向盘转角一直存在明显抖动,标准差为 91.10° ; 增量式LQR控制和SMC+LQR的转向盘转角仅在曲率变化较大的路段存在明显抖动,标准差分别为 89.09° 和 85.91° 。在双移线后期趋于稳定的过程中(图中5.5~8.0s),滑模控制、增量式LQR控制和SMC+LQR的转向盘转角标准差分为 18.25° 、 8.00° 、 14.61° ,SMC+LQR的标准差比滑模控制的标准差下降了19.95%,说明本算法可以在很大程度上削弱抖振。



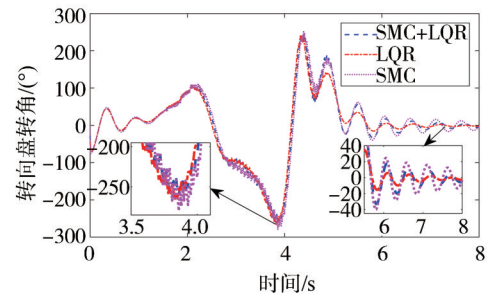
(a) 行驶轨迹



(b) 横向误差



(c) 航向误差



(d) 转向盘转角

图5 算法对比仿真结果图

图6描述了SMC+LQR算法过程中参数 λ_{LQR} 随时间的变化,在横向误差最大(4.7s时)参数 λ_{LQR} 最小,说明模糊控制器满足在线整定参数的需求。

3.2 质量变化仿真

为验证系统对模型不确定性的鲁棒性,在车辆的车厢部分分别增加1 000和2 000 kg的载荷,以改变车辆的总质量 m 和质心到前后轴的距离 a, b 。仿

表5 仿真分析算法对比

项目	最大值	标准差
滑模横向误差/m	0.317	0.088
LQR 横向误差/m	0.336	0.130
SMC+LQR 横向误差/m	0.310	0.106
滑模航向误差/rad	-0.052	0.018
LQR 航向误差/rad	-0.038	0.013
SMC+LQR 航向误差/rad	-0.048	0.015

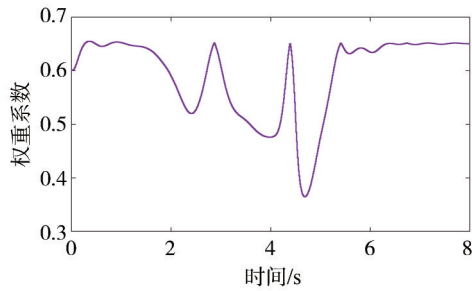
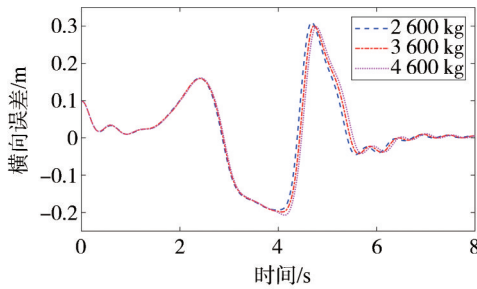
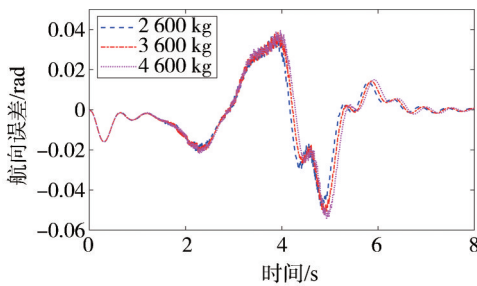


图6 权重系数变化图

真时,按实际情况更改纵向控制器中的质量参数 m ,而保持横向控制器中的质量 $m = 2600 \text{ kg}$ 不变,得到系统的执行误差如图7所示。



(a) 横向误差



(b) 航向误差

图7 不同载重仿真对比图

图7(a)和图7(b)描述了3种载重下SMC+LQR在双移线工况下的横向误差和航向误差。可以看出,总质量为2600 kg时的最大横向误差为0.310 m,最大航向误差为-0.048 rad;总质量为3600 kg时

的最大横向误差为0.301 m,最大航向误差为-0.052 rad;总质量为4600 kg时的最大横向误差为0.298 m,最大航向误差为-0.055 rad。可见,在车厢中施加载荷后,虽模型存在不确定性,控制效果有所下降,但并不明显,说明本算法可以应对模型不确定性。

结果表明,SMC+LQR能较好地结合滑模控制和增量式LQR控制的优点,在保证鲁棒性的同时削弱抖振。

4 实车试验

为验证算法的实车效果,基于EV18平台进行实车试验。试验车配备有线控底盘、域控制器,安装有激光雷达、毫米波雷达、环视摄像头、组合惯导等传感器,如图8所示。



图8 EV18测试平台

车辆的软件架构如图9所示,MCU底层驱动通过CAN信号与车辆系统通讯,Simulink算法程序通过UDP与MCU进行通讯。横向控制接口为转向盘转角,纵向控制接口为驱动电机转矩和制动减速度,信号的传输频率均为100 Hz。

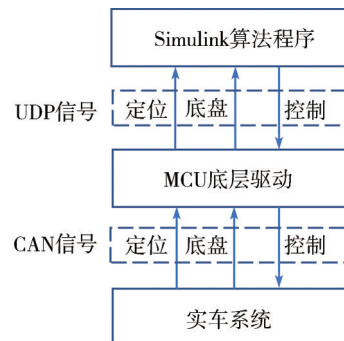


图9 车辆软件架构图

车辆动力学参数如表6所示,其中侧偏刚度和质心位置为估计值,存在一定的参数不确定性。

表6 实车试验车辆参数

参数	数值
质量 m/kg	2 850
绕 z 轴转动惯量 $I_z/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	4 500
质心到前轴的距离 a/m	1.20
质心到后轴的距离 b/m	2.108
前轴总侧偏刚度 $k_{f1}/(\text{N}\cdot\text{rad}^{-1})$	-170 000
后轴总侧偏刚度 $k_{r1}/(\text{N}\cdot\text{rad}^{-1})$	-170 000
转向传动比	22

测试场地为武汉市经济开发区某公开道路,期望路径为滤波平滑后的离散轨迹点序列。

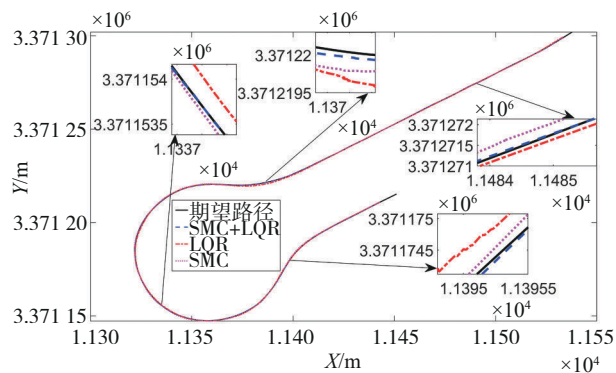
4.1 算法对比试验

为验证系统对外界扰动的鲁棒性,选用大曲率环岛工况,包含左换道路段和环岛路段。为验证系统对参数摄动的鲁棒性,将纵向期望速度设置为变量,在左换道路段下为 40 km/h,进入环岛时逐渐降至 25 km/h。算法参数均为调试后的最优参数,试验结果如图 10 所示。

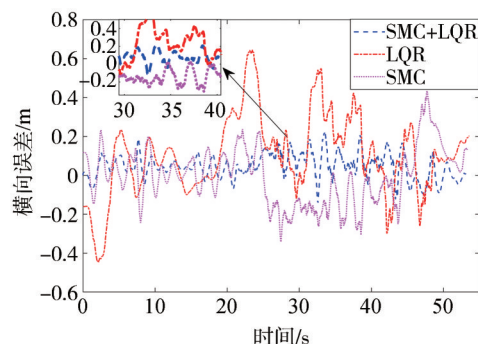
图 10(a)描述了增量式 LQR 控制、滑模控制和 SMC+LQR 的行驶轨迹。可以看出,在进出环岛和环岛中点时,对应的误差偏大,滑模控制的跟踪速度最快,增量式 LQR 控制最为平稳,但跟踪速度最慢。

图 10(b)和图 10(c)描述了 3 种算法的横向误差和航向误差,除去起步阶段的统计学指标如表 7 所示。滑模控制在换道的 7.3 s 时、进入环岛的 15.2 s 时、环岛中的 34.8 s 时,抖振有所加剧,但均具备收敛趋势。SMC+LQR 在跟踪速度和跟踪精度上略低于滑模控制,但抖振现象明显减弱。3 种算法的航向误差在环岛中均出现跳变,是由于期望轨迹为离散轨迹点序列,匹配点期望航向角的差异在环岛中比直线中更为明显。在图 10(a)中,车辆轨迹并未出现明显偏离,在图 10(b)中,车辆横向误差变化平稳,说明此现象没有对跟踪效果造成明显影响。

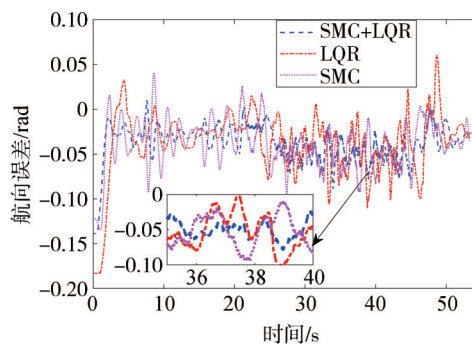
图 10(d)描述了 3 种算法的转向盘转角。可以看出,在换道路段中,滑模控制的转向盘转角存在明显抖振,增量式 LQR 控制和 SMC+LQR 的转向盘转角整体变化平稳,说明本算法可以在很大程度上削弱抖振。在环岛路段中,三者的转向盘均有一定幅度抖动,系环岛路段曲率变化复杂和商用车的转向间隙导致。在图 10(a)中,车辆可以实现环岛路段的跟踪,说明此现象没有对跟踪效果造成明显影响。



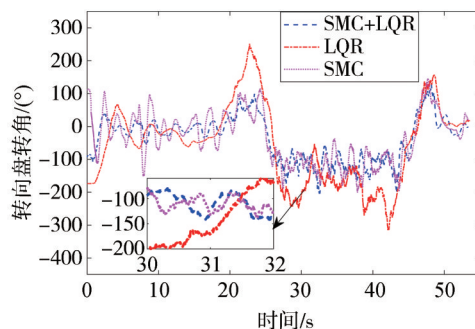
(a) 行驶轨迹



(b) 横向误差



(c) 航向误差



(d) 转向盘转角

图 10 算法对比试验结果图

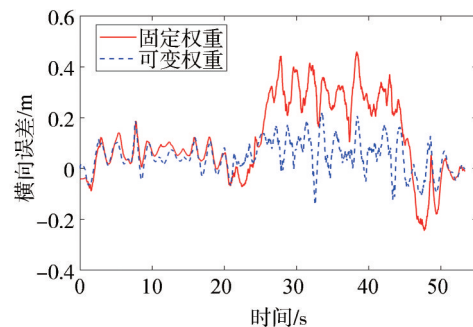
4.2 可变模糊权重试验

为验证模糊控制器的控制效果,设计定权重控

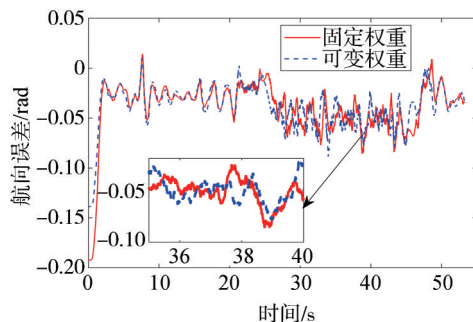
表7 环岛试验算法对比

项目	最大值	标准差
滑模横向误差/m	0.432	0.146
LQR 横向误差/m	0.646	0.206
SMC+LQR 横向误差/m	0.218	0.064
滑模航向误差/rad	-0.095	0.024
LQR 航向误差/rad	-0.116	0.027
SMC+LQR 航向误差/rad	-0.089	0.017

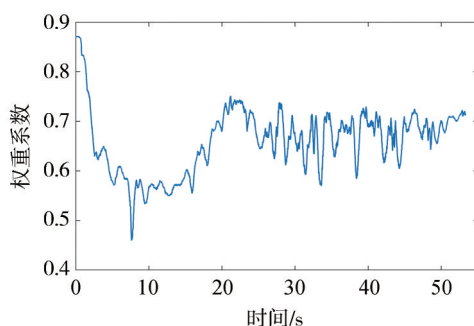
制算法,将 λ_{LQR} 设为定值0.7,与模糊控制器对比。相应测试结果如图11所示。



(a) 横向误差



(b) 航向误差



(c) 权重系数

图11 可变权重试验结果图

图11(a)和图11(b)描述了两者的横向误差和航向误差。除去起步阶段的统计学指标如表8所示。可以看出,可变权重算法的误差在整体上低于

固定权重算法,模糊控制器具备良好控制效果。

表8 可变权重试验对比

项目	最大值	标准差
固定权重横向误差/m	0.460	0.152
可变权重横向误差/m	0.218	0.064
固定权重航向误差/rad	-0.110	0.018
可变权重航向误差/rad	-0.089	0.017

图11(c)描述了可变权重过程中参数 λ_{LQR} 随时间的变化,误差偏大和车速偏高时对应的参数 λ_{LQR} 偏小,说明模糊控制器满足在线整定参数的需求,具有更好的机动性和适应性。

5 结论

本文通过将实时性强、不易发生抖振的增量式LQR控制和鲁棒性强的基于扩张观测器的滑模控制相结合,在提升系统鲁棒性的同时削弱系统抖振,并使用粒子群算法整定增量式LQR的参数。在换道与环岛实车试验中,SMC+LQR的最大横向误差为0.22 m,低于滑模控制的最大横向误差0.43 m和LQR的最大横向误差0.65 m。说明混合算法对复杂扰动具备良好的控制效果。

本文的研究仅考虑了车辆在行驶过程中的部分复杂扰动,实车试验仅在轻型货车上得到验证。轮胎非线性特性、载荷转移等其他类型的扰动,以及在重型货车上的控制效果还有待深入研究。

参考文献

- [1] CLAUDINE Badue, RÂNIK Guidolini, RAPHAEL Vivacqua carneiro, et al. Self-driving cars: a survey[J]. Expert Systems With Applications, 2021, 165: 113816.
 - [2] PADEN B, CAP M, YONG S Z, et al. A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2016, 1(1): 33-55.
 - [3] YAO Qiangqiang, TIAN Ying, WANG Qun, et al. Control strategies on path tracking for autonomous vehicle: state of the art and future challenges[J]. IEEE Access, 2020, 8: 161211-161222.
 - [4] HAN G N, FU W P, WANG W, et al. The lateral tracking control for the intelligent vehicle based on adaptive PID neural network[J]. Sensors, 2017, 17(6): 1244.
 - [5] 龚建伟, 龚乘, 林云龙, 等. 智能车辆规划与控制策略学习方法综述[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(7): 665-674.
- GONG J W, GONG C, LIN Y L, et al. Review on machine learning methods for motion planning and control policy of intelligent vehicles [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(7): 665-674.

- [6] MOHAMMAD Rokonzaman, NAVID Mohajer, SAEID Nahavandi, et al. Review and performance evaluation of path tracking controllers of autonomous vehicle [J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2021, 15(5): 645-670.
- [7] 潘世举, 李建市, 李华, 等. 基于反馈纯跟踪的智能车路径跟随方法[J]. *汽车工程*, 2023, 45(7): 1134-1144.
PAN S J, LI J S, LI H, et al. Path following method of intelligent vehicles based on feedback pure tracking method[J]. *Automotive Engineering*, 2023, 45(7): 1134-1144.
- [8] AMER N H, HUDHA K, ZAMZURI H, et al. Adaptive modified Stanley controller with fuzzy supervisory system for trajectory tracking of an autonomous armoured vehicle[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2018, 105: 94-111.
- [9] 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, 43.
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.
- [10] WANG Zhaoqiang, SUN Keyang, MA Siqun, et al. Improved linear quadratic regulator lateral path tracking approach based on a real-time updated algorithm with fuzzy control and cosine similarity for autonomous vehicles [J]. *Electronics*, 2022, 22(11): 3073.
- [11] XU S B, 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.
- [12] NADA Awad, AHMED Lasheen, MAHMOUD Elnaggar, et al. Model predictive control with fuzzy logic switching for path tracking of autonomous vehicles [J]. *ISA Transactions*, 2022, 129: 193-205.
- [13] BAI G X, MENG Y, LIU L, et al. Review and comparison of path tracking based on model predictive control [J]. *Electronics*, 2019, 10(8): 1077.
- [14] NI Jun, ZHOU Junjie, HU Jibin, et al. Robust path following control at driving/handling limits of an autonomous electric racecar [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(6): 5518-5526.
- [15] 熊璐, 杨兴, 卓桂荣, 等. 无人驾驶车辆的运动控制发展现状综述[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(10): 127-143.
XIONG L, YANG X, ZHUO G R, et al. Review on motion control of autonomous vehicles [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(10): 127-143.
- [16] XIE Fengxi, LIANG Guozhen, CHIEN Yingren. Highly robust adaptive sliding mode trajectory tracking control of autonomous vehicles [J]. *Sensors*, 2023, 23(7): 3454.
- [17] ARMIN Norouzi, MILAD Masoumi, ALI Barari, et al. Lateral control of an autonomous vehicle using integrated backstepping and sliding mode controller [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2018, 233(1): 141-151.
- [18] WANG Pengwei, GAO Song, LI Liang, et al. Automatic steering control strategy for unmanned vehicles based on robust backstepping sliding mode control theory [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 64984-64992.
- [19] KWANGSEOK Oh, JAHOO Seo. Development of a sliding-mode-control-based path-tracking algorithm with model-free adaptive feedback action for autonomous vehicles [J]. *Sensors*, 2022, 23(1): 405.
- [20] 陈慧岩, 陈舒平, 龚建伟. 智能汽车横向控制方法研究综述 [J]. *兵工学报*, 2017, 38(6): 1203-1214.
CHEN H Y, CHEN S P, GONG J W. A review on the research of lateral control for intelligent vehicles [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(6): 1203-1214.
- [21] 徐海祥, 李超逸, 余文墨, 等. 基于扩张状态观测器的智能船舶寻迹预测控制 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(12): 143-152.
XU H X, LI C Y, YU W Z, et al. Predictive control for intelligent ship path following based on extended state observer [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 49(12): 143-152.
- [22] 郭振航. 基于模型预测控制的无人驾驶车辆横向控制器设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
GUO Z H. Design of lateral controller for intelligent driving vehicle based on model predictive control [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.