

## 基于线控四轮转向系统的车辆横向控制策略

马瑞兰<sup>1</sup>, 郭唯浩<sup>2</sup>, 姚俊明<sup>1</sup>, 郭世永<sup>1,\*</sup>

(1. 青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 青岛 266525; 2. 歌尔科技有限公司, 青岛 266100)

**摘要:** 线控四轮转向系统具备既可以提高车辆低速行驶的灵活性又可以保证高速行驶的稳定性的优点。针对车辆参数时变特性和环境的随机扰动降低了线控四轮转向系统性能的问题, 提出一种自适应滑模控制策略来提高车辆的横向稳定性和轨迹跟踪能力。首先建立多自由度车辆横向动力学模型及理想的横向响应参考模型; 然后考虑车辆模型的非线性, 采用扩展卡尔曼滤波和改进积分法融合的方法观测车辆的质心侧偏角, 以前后轴刚度作为自适应参数, 采用自适应滑模控制策略降低参数时变和环境扰动的影响, 达到提高参考模型跟踪性能的目的; 最终以驾驶员模型进行 Carsim/Simulink 联合仿真。仿真结果表明所提出的线控四轮转向横向控制策略能够降低横向跟踪偏差及减小质心侧偏角的峰值。

**关键词:** 线控四轮转向; 自适应滑模控制; 扩展卡尔曼滤波; 质心侧偏角观测器; 横向跟踪偏差

中图分类号: U471.1; U463.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2023)06-0155-08

## Vehicle lateral control scheme based on the four-wheel steering-by-wire system

MA Ruilan<sup>1</sup>, GUO Weihao<sup>2</sup>, YAO Junming<sup>1</sup>, GUO Shiyong<sup>1,\*</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Goertek Technology Limited Liability Company, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** The four-wheel steering-by-wire system can not only improve the flexibility of low-speed driving, but also ensure the stability of high-speed driving. In order to solve the problem that the time-varying characteristics of vehicle parameters and the random disturbances from the environment degrade the performance of the four-wheel steering-by-wire system, an adaptive sliding mode control strategy is proposed in this study to improve the lateral stability and trajectory tracking ability of the vehicle. Firstly, the lateral dynamics model of multi-degree-of-freedom vehicle and the ideal lateral response reference model are established. Then, considering the nonlinearity of the vehicle model, the sideslip angle of the vehicle is observed by using an Extended Kalman filter and an improved integration method. In order to improve the trajectory tracking performance of the reference model, the front and rear axle stiffness are taken as adaptive parameters and an adaptive sliding mode control strategy is adopted to reduce the influence of time-varying parameters and environmental disturbances. Finally, the Carsim/Simulink joint simulation is conducted by using one driver

收稿日期: 2022-08-19

基金项目: 汽车仿真与控制国家重点实验室开放基金资助项目(20210232)

作者简介: 马瑞兰(1990-), 女, 山东东阿人。硕士, 研究方向为汽车电子及电动汽车。E-mail: 784493018@qq.com。

\* 通信作者: 郭世永(1963-), 男, 天津人。博士, 教授, 主要从事汽车安全、机电一体化控制研究。E-mail: gsy6322@126.com。

model. The simulation results show that the proposed four-wheel steering-by-wire lateral control strategy can reduce the lateral tracking error and the peak value of the sideslip angle.

**Key words:** four-wheel steering-by-wire; adaptive sliding mode control; Extended Kalman filter; sideslip angle observer; lateral tracking error

伴随着汽车技术的进步及汽车保有量的增加,汽车已经成为首选的出行工具。为满足消费者对车辆舒适性日益增长的需求,车辆的轮廓变得更长、更高,体型的增加导致汽车的灵活性降低<sup>[1]</sup>,从而增加了驾驶负担。线控四轮转向技术作为一种前沿的底盘电控技术,可以兼顾车辆的舒适性和灵活性<sup>[2]</sup>,目前已经被用于多款量产车型。其工作原理具体可以描述为当车辆低速行驶时,后轮转角与前轮转角相反,用以减小轴距车辆在泊车工况下的转弯半径,达到降低驾驶员操纵负担的目的;在车辆高速行驶时,后轮转角与前轮转角转向相同,用于提高车辆的侧向稳定性,同时降低驾驶员的心理负担。但是传统的前轮转向系统将转向传动比设定为固定值,这很难满足不同车速下的需求,难以实现理想的横向运动状态响应特性。因此,线控四轮转向应运而生,被用来提高自动驾驶车辆在循迹控制过程中的跟踪精度和稳定性<sup>[3-6]</sup>。

为了提高自动驾驶车辆在循迹控制过程中的跟踪精度和稳定性,首先搭建线控四轮转向车辆模型<sup>[7]</sup>,再结合 Dugoff 经验轮胎模型用来提高模型的精度、避免获取复杂的轮胎参数,然后分析横向状态参考模型得到饱和状态下的车辆横摆角速度。考虑到传感器成本高昂,难以直接测量侧向速度,另外车辆侧偏力因路面附着系数的变化及轮胎饱和等因素呈现出非线性,再加上路面扰动及模型参数时变特性的影响也会降低横向运动状态的跟踪性能,因此本文采用扩展卡尔曼滤波算法应对非线性的影响,融合改进积分法用以提高观测器的鲁棒性和观测精度,提出一种自适应滑模控制策略,采用横摆角速度误差和质心侧偏角误差定义滑模面,将前后轴侧偏刚度作为自适应参数,通过李雅普诺夫函数证明所提控制策略的稳定性,最终,设计考虑驾驶员反应时间和上臂肌肉力的驾驶员模型,在 Carsim/Simulink 联合仿真环境中搭建线控四轮转向控制策略。

## 1 模型建立

### 1.1 线控四轮转向车辆模型

如图 1 所示,线控四轮转向车辆模型的输入为前轮转角和后轮转角,模型状态为质心侧偏角和横摆角速度。车辆的侧向速度差分方程和横摆运动差分方程根据牛顿第二定律总结为<sup>[6]</sup>

$$\begin{cases} \dot{\beta} = \frac{F_{y,f} + F_{y,r} + d_y}{m v_x} - \dot{\gamma} \\ \ddot{\gamma} = \frac{a F_{y,f} - b F_{y,r} + d_z}{I_z} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $m, I_z, a, b$  分别为整车质量、车辆质心绕  $z$  轴转动惯量、前轴中心到质心的距离及后轴中心到质心的距

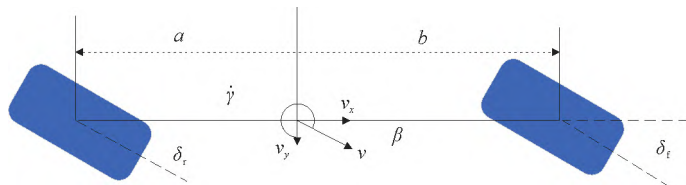


图 1 线控四轮转向车辆模型

离; $\beta, \dot{\gamma}, v_x$  分别为质心侧偏角、车辆的横摆角速度和纵向车速; $\dot{\beta}, \ddot{\gamma}$  分别为质心侧偏角速度、横摆角加速度; $F_{y,f}, F_{y,r}$  分别为等效到前轴和后轴的侧向力; $d_y, d_z$  分别为侧向力的干扰和横摆力矩的干扰,且这些干扰是有界的。

### 1.2 Dugoff 轮胎模型

轮胎形状以及轮胎的纵向载荷决定轮胎在横向运动过程中的性能,Dugoff 轮胎模型将用于描述轮胎侧向的动力学关系,其优势在于将轮胎模型综合到侧偏刚度中,提高模型保真度的同时避免复杂的参数调谐。图 2 描述了车辆前后轴侧偏力与侧偏角的关系。

具体可以解释为在非剧烈的驾驶运动中,轮胎为转向运动提供的侧向力较小,轮胎侧向力与轮胎侧偏角近似为线性关系;当轮胎进入饱和区,随着侧偏角的增加,侧向力不再上升。

前后轴的侧偏角变化如式(2)所示:

$$\alpha_f = \arctan\left(\frac{v_y + a\dot{\gamma}}{v_x}\right) - \delta_f$$

$$\alpha_r = \arctan\left(\frac{v_y - b\dot{\gamma}}{v_x}\right) - \delta_r \quad (2)$$

式中:  $\alpha_f, \alpha_r$  分别为前后轴侧偏角;  $\delta_f, \delta_r$  分别为前后轴输入转角;  $v_x, v_y$  分别为车辆质心处的纵向和横向车速。

Dugoff 轮胎模型可以被描述为

$$F_y = -C_a f(\lambda) \tan \alpha \quad (3)$$

式中:  $C_a$  为等效侧偏刚度;  $\alpha$  为侧偏角;

$$f(\lambda) = \begin{cases} 1, & \lambda \geq 1 \\ (2-\lambda)\lambda, & \lambda < 1 \end{cases}, \lambda = \frac{\mu F_z}{2|C_a \tan \alpha|}$$

为切换轮胎线性区和饱和区的分段函数,  $\mu$  为路面附着系数。

### 1.3 横向运动状态参考模型

理想的横向运动状态响应特性随车速变化,并且呈现不足转向的趋势,在固定车速下横摆角速度增益不随方向盘转角以及路面发生变化。理想的参考横摆角速度的稳态响应由二自由度模型推导<sup>[8]</sup>:

$$\dot{\gamma}_{\text{ref}} = \frac{v_x/L}{1 + K v_x^2} \delta_{\text{sw}} \quad (4)$$

式中:  $K = \frac{m}{L^2} \left( \frac{a}{C_r} - \frac{b}{C_f} \right)$  为车辆转向系统、轮胎和悬架特性的综合参数;  $L$  为车辆轴距;  $\delta_{\text{sw}}$  为前轮转角。

当车辆的转向运动过于剧烈,轮胎进入饱和,参考横摆角速度将被修改为

$$\dot{\gamma}_{\text{ref}} = \frac{\mu g}{v_x} \text{sgn}(\delta_f) \quad (5)$$

式中:  $g$  为重力加速度。

质心侧偏角的理想值为 0:

$$\beta_{\text{ref}} = 0 \quad (6)$$

## 2 质心侧偏角观测器设计

现有的低成本车传感器很难准确地观测到质心侧偏角,质心侧偏角的观测算法一直是车辆动力学研究过程中的热点<sup>[9]</sup>。在观测器的设计过程中,主要包括两种策略,第 1 种是基于车辆动力学模型的观测器,主要是扩展/无迹卡尔曼滤波、 $H_\infty/H_2$  鲁棒观测器、T-S 模糊观测器及基于深度学习理论的观测器等<sup>[10]</sup>;第 2 种是基于车辆运动学算法的观测器,此种观测器大多使用积分法或改进的算法。依赖车辆动力学算法的观测器很难获取复杂的车辆参数,并且车辆模型在轮胎饱和区呈现出高度的非线性,第 2 种观测器的缺点是传感器存在噪声及偏置,产生的累计误差难以控制<sup>[11]</sup>。本文采用扩展卡尔曼滤波算法用来克服车辆动力学的非线性问题,根据侧向加速度  $a_y$  的幅值融合改进积分法的优点,避免大加速度下模型失真对观测结果的影响,观测器的构成如图 3 所示。

图 3 描述了扩展卡尔曼滤波算法及其与改进积分法的融合过程,在改进积分法的计算过程中,为了降低传感器信号中偏置和噪声的影响,需要加入阻尼系数对积分项进行修正:

$$\begin{cases} v_{y,k} = v_{y,k-1} + \left( a_{y,k-1} - \dot{\gamma}_{k-1} v_{x,k-1} - \frac{v_{y,k-1}}{\tau_\beta} \right) dt \\ \beta_k \approx \frac{v_{y,k}}{v_{x,k}} \end{cases} \quad (7)$$

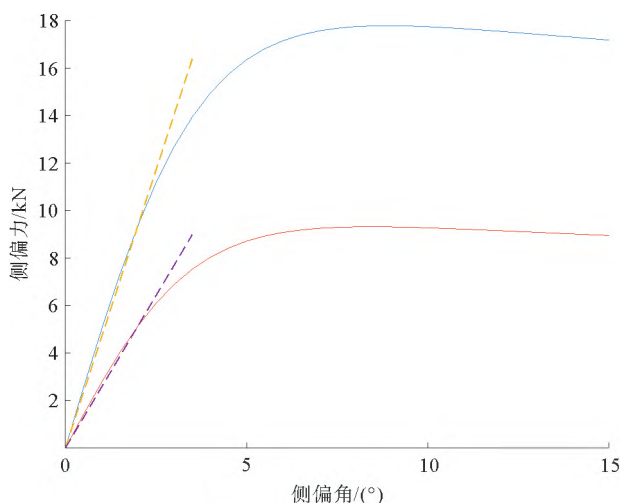


图2 轮胎侧向力-侧偏角曲线

—前轴侧偏特性; —后轴侧偏特性;  
---前轴中心区线性拟合曲线; ---后轴中心区线性拟合曲线

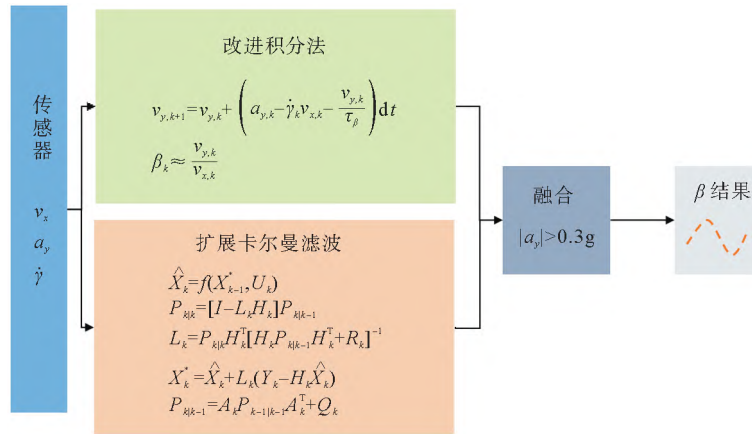


图 3 质心侧偏角融合观测器

用于扩展卡尔曼滤波的车辆动力学模型经过离散化为

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = f(\mathbf{X}_{k-1}, \mathbf{U}_k) + \boldsymbol{\varepsilon}_k \\ \mathbf{Y}_k = h(\mathbf{X}_k, \mathbf{U}_k) + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{U}_k = [\delta_{f,k} \quad \delta_{r,k}]^T$  为前轴和后轴等效转角的输入;  $\mathbf{X}_k = [\beta_k \quad \dot{\gamma}_k]^T$  为系统状态; 系统的输出为横摆角速度和侧向加速度, 即  $\mathbf{Y}_k = [\dot{\gamma}_k \quad a_{y,k}]^T$ 。

扩展卡尔曼滤波存在 2 个过程, 第 1 个过程为基于车辆动力学模型在时间上的更新:

1) 预测状态更新

$$\hat{\mathbf{X}}_k = f(\mathbf{X}_{k-1}^*, \mathbf{U}_k) \quad (9)$$

2) 预测协方差更新

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{A}_k \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{A}_k^T + \mathbf{Q}_k \quad (10)$$

第 2 个过程为基于传感器测量的更新:

1) 扩展卡尔曼滤波增益更新

$$\mathbf{L}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T [\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k]^{-1} \quad (11)$$

2) 状态融合过程

$$\mathbf{X}_k^* = \hat{\mathbf{X}}_k + \mathbf{L}_k (\mathbf{Y}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_k) \quad (12)$$

3) 协方差更新

$$\mathbf{P}_{k|k} = [\mathbf{I} - \mathbf{L}_k \mathbf{H}_k] \mathbf{P}_{k|k-1} \quad (13)$$

以上,  $\mathbf{A}_k = \frac{\partial f(\mathbf{X}_{k-1}^*, \mathbf{U}_k)}{\partial \mathbf{X}}$ ,  $\mathbf{H}_k = \frac{\partial h(\hat{\mathbf{X}}_k)}{\partial \mathbf{X}}$  为雅克比矩阵;  $\mathbf{Q}_k, \mathbf{R}_k$  分别为扩展卡尔曼滤波的过程协方差矩阵、测量误差协方差矩阵。

### 3 线控四轮转向横向控制器

等效的前后轴侧偏刚度因轮胎参数不同、转向过程载荷转移及轮胎饱和发生变化。在横向控制器的设计过程中, 系统等效为线性二自由度模型, 前后轴的侧偏刚度作为自适应参数:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{D}\mathbf{u} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中, 系统的系数矩阵分别为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{C_f + C_r}{mv_x} & \frac{aC_f - bC_r}{mv_x^2} - 1 \\ \frac{aC_f - bC_r}{I_z} & \frac{a^2C_f + b^2C_r}{I_z v_x} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{-C_f}{mv_x} & \frac{-C_r}{mv_x} \\ \frac{-aC_f}{I_z} & \frac{bC_r}{I_z} \end{bmatrix}; \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{C_f + C_r}{mv_x} & \frac{aC_f - bC_r}{mv_x} \end{bmatrix}; \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{-C_f}{m} & \frac{-C_r}{m} \end{bmatrix}$$

车辆横向控制中跟踪误差为

$$\mathbf{e} = [e_1 \quad e_2]^T = [\dot{\gamma}_{\text{ref}} - \dot{\gamma} \quad \beta_{\text{ref}} - \hat{\beta}]^T \quad (15)$$

自适应滑模控制器<sup>[12]</sup>的滑模面定义为  $\mathbf{s} = [e_1 \quad e_2]^T$ , 切换函数的导数推导为  $\dot{\mathbf{s}} = \dot{\mathbf{X}}_{\text{ref}} - \mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{B}\mathbf{u}$ , 其中控制输入为

$$\mathbf{u} = \hat{\mathbf{B}}^{-1}(\dot{\mathbf{X}}_{\text{ref}} - \hat{\mathbf{A}}\mathbf{X}_{\text{ref}}) - (\boldsymbol{\varepsilon} \text{sgn}(\mathbf{s}) + \mathbf{k}\mathbf{s}) \quad (16)$$

式中:  $\hat{\mathbf{A}}, \hat{\mathbf{B}}$  将在自适应律的设计中更新。

为了设计自适应律<sup>[13]</sup>, 定义侧偏刚度偏差为

$$\mathbf{C}_e = [C_f - \hat{C}_f \quad C_r - \hat{C}_r]^T = [C_{fe} \quad C_{re}]^T \quad (17)$$

李雅普诺夫函数定义为  $V = \frac{1}{2}\mathbf{s}^T\mathbf{s} + \frac{1}{2}\mathbf{C}_e^T\boldsymbol{\Gamma}\mathbf{C}_e$ 。可以推出李亚普函数的导数为

$$\dot{V} = \mathbf{s}^T(\mathbf{A} + \mathbf{A}^T + \mathbf{B}\mathbf{k} + \mathbf{k}^T\mathbf{B}^T)\mathbf{s} + \hat{\mathbf{C}}_e^T\boldsymbol{\Gamma}\dot{\mathbf{C}}_e + \mathbf{s}^T(\mathbf{I} - \mathbf{B}\hat{\mathbf{B}}^{-1})(\dot{\mathbf{X}}_{\text{ref}} - \hat{\mathbf{A}}\mathbf{X}_{\text{ref}}) + \mathbf{s}^T(\hat{\mathbf{A}} - \mathbf{A})\mathbf{X}_{\text{ref}} \quad (18)$$

侧偏刚度自适应律设计为

$$\dot{\mathbf{C}}_e = \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \begin{bmatrix} -\mathbf{s}^T(\mathbf{B}_{c1}(\dot{\mathbf{X}}_{\text{ref}} - \hat{\mathbf{A}}\mathbf{X}_{\text{ref}}) + \mathbf{A}_{c1}\mathbf{X}_{\text{ref}}) \\ -\mathbf{s}^T(\mathbf{B}_{c2}(\dot{\mathbf{X}}_{\text{ref}} - \hat{\mathbf{A}}\mathbf{X}_{\text{ref}}) + \mathbf{A}_{c2}\mathbf{X}_{\text{ref}}) \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中, 系数矩阵的定义为

$$\mathbf{A}_{c1} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{mv_x} & \frac{-a}{mv_x^2} \\ \frac{-a}{I_z} & \frac{-a^2}{I_z v_x} \end{bmatrix}; \mathbf{B}_{c1} = \frac{-1}{\hat{C}_f} \begin{bmatrix} \frac{b}{L} & \frac{I_z}{mv_x L} \\ \frac{abmv_x}{LI_z} & \frac{a}{L} \end{bmatrix}; \mathbf{A}_{c2} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{mv_x} & \frac{b}{mv_x^2} \\ \frac{b}{I_z} & \frac{-b^2}{I_z v_x} \end{bmatrix}; \mathbf{B}_{c2} = \frac{-1}{\hat{C}_r} \begin{bmatrix} \frac{a}{L} & \frac{-I_z}{mv_x L} \\ \frac{-abmv_x}{LI_z} & \frac{b}{L} \end{bmatrix}$$

从而, 李雅普诺夫稳定性得以保证:  $\dot{V} = -\mathbf{s}^T(\mathbf{A} + \mathbf{A}^T + \mathbf{B}\mathbf{k} + \mathbf{k}^T\mathbf{B}^T)\mathbf{s} - \boldsymbol{\varepsilon}^T \text{sgn}(\mathbf{s}) < 0$ 。

## 4 Carsim/Simulink 仿真与验证

为验证所提出线控四轮转向算法的有效性, 从神经肌肉力学的角度建立拟人化驾驶员模型。理想的参考模型需要合理的转角输入, 因此结合 Carsim 车辆动力学模型, 在 Simulink 搭建驾驶员模型、参考模型、质心侧偏角观测模型及控制器模型。

### 4.1 驾驶员模型

驾驶员通过注视行为获得必要的信息过程被称为预瞄。预瞄模型的建立通常包括 3 个要素: 驾驶员在行驶过程中的预瞄时间、基于预瞄偏差的控制器及考虑驾驶员神经肌肉反应的时间常数。图 4 为本文所采用的驾驶员预瞄模型, 其中  $d$  为驾驶员的预瞄距离,  $e_y$  为在驾驶过程中的横向偏差<sup>[14]</sup>。

驾驶员的预瞄时间在一定的取值范围, 根据需求在本文中被设定为经验常数  $T = d/v_x$ 。横向跟踪偏差被定义为<sup>[15-16]</sup>

$$e_y = y(t+T) - y(t) - d \tan \phi \quad (20)$$

式中:  $\phi$  为航向角;  $y(t), y(t+T)$  分别为当前时刻、预瞄时刻的横向坐标。

根据比例-积分-微分的反馈策略, 驾驶员模型输出的转角为

$$\delta_{sw}^* = \frac{1}{T^2} (K_p e_y + K_i \int_0^t e_y dt + K_d \frac{de_y}{dt}) \quad (21)$$

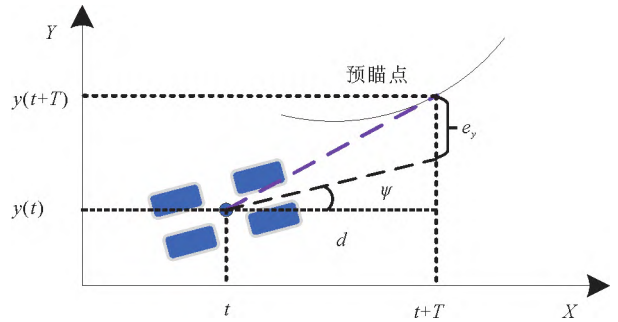


图4 驾驶员模型



式中:  $K_p, K_i, K_d$  分别为反馈策略中的比例增益、积分增益及微分增益;  $t$  为误差积分的时间。

按照图 5 所示, 进行 Carsim/Simulink 联合仿真。图中, 输入量设置为  $v_x, a_y, \gamma$ : 车辆的纵向车速、车辆的横向加速度、车辆的横摆角。

在仿真中采用延时传递函数和一阶惯性传递函数模拟驾驶员上臂的神经肌肉的反应特性:

$$\delta_{sw} = \frac{e^{-\tau_d s}}{1 + \tau_h s} \delta_{sw}^* \tag{22}$$

式中:  $\tau_d, \tau_h$  分别为神经元反应延迟的时间常数及上臂肌肉力反应的时间常数;  $\delta_{sw}^*$  为驾驶员模型输出的转角;  $s$  为拉普拉斯算子。

4.2 联合仿真试验结果及分析

在 Carsim 软件中设定车辆动力学模型, 车辆类型选择 C-Class 车辆, 具体参数信息如表 1 所示。设计定速 100 km/h 的双移线仿真工况<sup>[17]</sup>, 在仿真过程对比地设计了无控制的前轮转向车辆。

控制器中的  $k$  为收敛率的射界,  $k = \begin{bmatrix} 2.0 & 0.427 \\ 12.1 & -0.44 \end{bmatrix}$ 。仿真结果如图 6 所示。

表 1 车辆参数

质量 $m/\text{kg}$	前轴到质心距离 $a/\text{m}$	后轴到质心距离 $b/\text{m}$	轴距 $L/\text{m}$	绕 $z$ 轴转动惯量 $I_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	前轴刚度 $C_f/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	后轴刚度 $C_r/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$
1500	1.015	1.895	2.91	1536.7	-123 588	-120 000

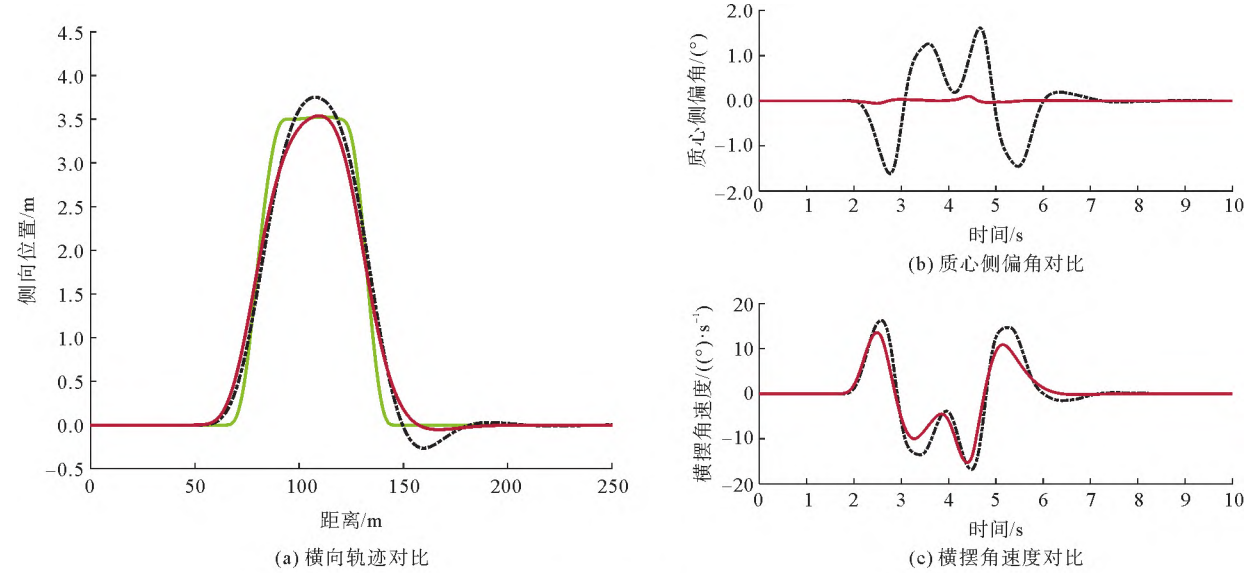


图 6 横向对比

— 参考路径; - - - 无控制; — 线控四轮转向

图 6 表明, 线控四轮转向的质心侧偏角的峰值远小于无控制的前轮转向车辆, 验证线控四轮转向系统可以提高横向运动的稳定性。控制效果如图 7 所示。

图 7(b) 及图 7(c) 清晰地展示了线控四轮转向车辆的横摆角速度实际值与参考值的误差较小, 质心侧偏角趋近于理想的参考值 0, 验证了自适应滑模控制器可以提高横向运动状态的跟踪性能。同时, 质心侧

偏角实际值和观测值基本一致,表明本文所提出扩展卡尔曼滤波与改进积分法融合算法具有良好的观测性能。

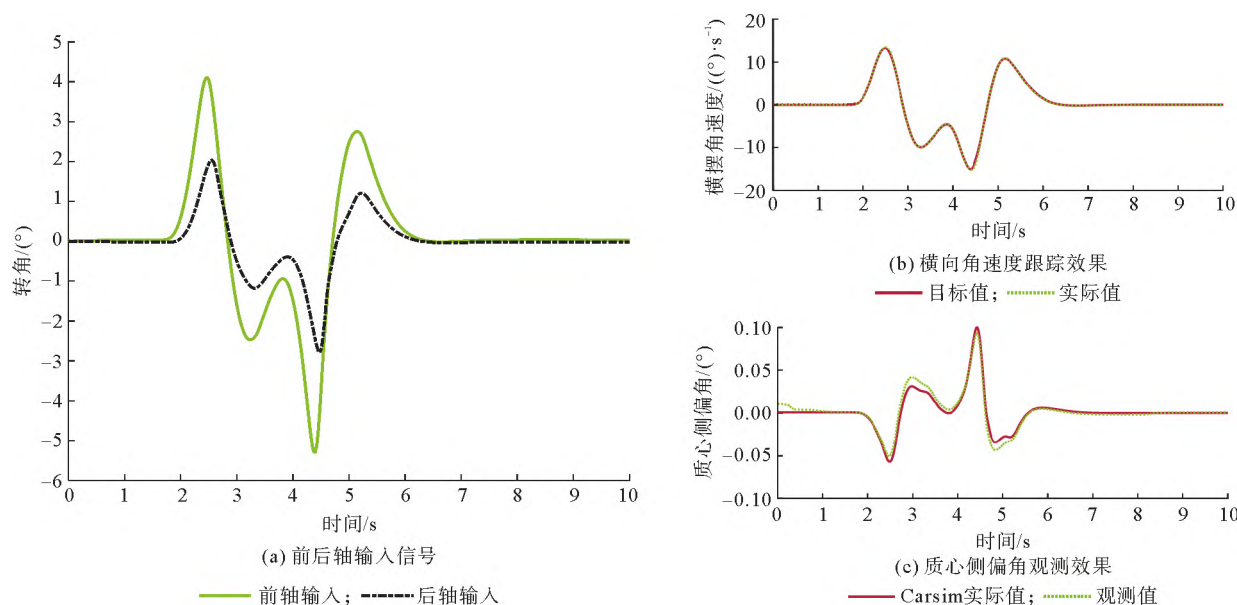


图7 控制效果对比

由图7(a)可以看出,在线控四轮转向系统中前轴转角和后轴转角的方向相同,从而提高换道过程中车身的稳定性。

## 5 结论

本文所提出的扩展卡尔曼滤波与改进积分法融合的策略可以良好地观测出车辆的实时质心侧偏角值,Dugoff 轮胎模型更准确描述了轮胎侧向力和侧偏角的关系,扩展卡尔曼滤波解决了对非线性模型最优估计的问题,在增大侧向加速度时切换为改进的积分法,避免了轮胎饱和导致模型失真的问题。

本文所提的自适应滑模控制器能够自适应前后轴刚度的变化,实现对横摆角速度和质心侧偏角的闭环控制并具有良好的控制效果,达到减小车辆横向运动中的轨迹跟踪偏差和降低质心侧偏角的峰值的目的。

## 参考文献 (References):

- [1] ZHANG J, WANG H, MA M, et al. Active front steering-based electronic stability control for steer-by-wire vehicles via terminal sliding mode and extreme learning machine[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 14713-14726.
- [2] MORTAZAVIZADEH S A, GHADERI A, EBRAHIMI M, et al. Recent developments in the vehicle steer-by-wire system[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(3): 1226-1235.
- [3] DENG B, SHAO K, ZHAO H. Adaptive second order recursive terminal sliding mode control for a four-wheel independent steer-by-wire system[J]. IEEE Access, 2020, 8: 75936-75945.
- [4] YU S, LI W, WANG W, et al. Nonlinear control of active four wheel steer-by-wire vehicles[J]. IEEE Access, 2019, 7: 127117-127127.
- [5] NAM K, FUJIMOTO H, HORI Y. Advanced motion control of electric vehicles based on robust lateral tire force control via active front steering[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 19(1): 289-299.
- [6] 孙浩宇, 张绍远, 刘建泽, 等. 超声电机驱动的赛车转向机构建模与仿真分析[J]. 青岛理工大学学报, 2020, 41(4): 115-120.  
SUN Haoyu, ZHANG Shaoyuan, LIU Jianze, et al. Modeling and simulation analysis of steering mechanism of racing car driven by ultrasonic motor[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2021, 41(4): 115-120.
- [7] 于树友, 谭雷, 王伍洋, 等. 基于三步法的汽车主动四轮转向控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(3): 934-942.  
YU Shuyou, TAN Lei, WANG Wuyang, et al. Control of active four wheel steering vehicle based on triple-step method[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2019, 49(3): 934-942.

- [8] 张聪,王振臣,程菊,等.4WIS-4WID 车辆横摆稳定性 AFS+ARS+DYC 滑模控制[J].汽车工程,2014,36(3):304-309.  
ZHANG Cong,WANG Zhenchen,CHENG Ju,et al. Sliding mode control of AFS+ARS+DYC for the yaw stability of a 4WIS-4WID vehicle[J].Utomotive Engineering,2014,36(3):304-309.
- [9] 程慧.两点预瞄驾驶员转向模型研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.  
CHENG Hui. Research on driver steering model based on two-point preview[D].Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2016.
- [10] 董婷.基于改进预瞄驾驶员模型的车道保持系统[J].汽车实用技术,2019(24):143-145.  
DONG Ting. Lane keeping system based on improved preview driver model[J].Automobile Applied Technology,2019(24):143-145.
- [11] GADOLA M, CHINDAMO D, ROMANO M, et al. Development and validation of a Kalman filter-based model for vehicle slip angle estimation[J].Vehicle System Dynamics,2014,52(1):68-84.
- [12] HUANG Kaiqi, LAO Ling. Auto anti-interference sliding mode control based on active front steering[C]//The 27th Chinese Control and Decision Conference(2015 CCDC). IEEE,2015:3533-3538.
- [13] LIU C,SUN W,ZHANG J. Adaptive sliding mode control for 4-wheel SBW system with Ackerman geometry[J].ISA Transactions,2020,96:103-115.
- [14] UNGOREN A Y,PENG H. An adaptive lateral preview driver model[J].Vehicle System Dynamics,2005,43(4):245-259.
- [15] 郭孔辉,付皓,丁海涛.基于扩展卡尔曼滤波的汽车质心侧偏角估计[J].汽车技术,2009(4):1-3.  
GUO Konghui,FU Hao,DING Haitao,et al. Estimation of CG sideslip angle based on Extended Kalman filter[J].Automobile Technology,2009(4):1-3.
- [16] BAGHERI F,KOMURCUGIL H,KUKRER O,et al. Multi-input multi-output-based sliding-mode controller for single-phase quasi-Z-source inverters[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2019,67(8):6439-6449.
- [17] PLESTAN F,SHTESSEL Y,BREGEAULT V,et al. New methodologies for adaptive sliding mode control[J].International Journal of Control,2010,83(9):1907-1919.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)

#### (上接第 154 页)

- [10] 赵巧,赵正.驾驶心理场模型:从驾驶员视角建模车辆跟驰过程[C]//第 32 届中国控制与决策会议论文集(4).合肥:[出版社不详],2020:68-73.DOI:10.26914/c.cnkihy.2020.034173.  
ZHAO Qiao,ZHAO Zheng. Driving psychological field model: Vehicle modeling following process from driver's perspective[C]//Proceedings of the 32nd China Conference on Control and Decision-making (4).Hefei:[s.n],2020:68-73.DOI:10.26914/c.cnkihy.2020.034173.
- [11] 李爽.车辆自适应巡航关键控制算法研究[D].开封:河南大学,2020.  
LI Shuang.A dissertation submitted to the graduate school of henan university in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of engineering science[D].Kaifeng:Henan University,2020.
- [12] JIANG Rui,WU Qingsong, ZHU Zuojin. Full velocity difference model for a car-following theory[J].Physical Review E, 2013, 18(5):1229-1234.
- [13] JIANG Rui,WU Qingsong. First-and second-order phase transitions from free flow to synchronized flow[J].Physica A:Statistical Mechanics and its Applications, 2003,322:676-684.
- [14] 曲大义,赵梓旭,贾彦峰,等.基于 Lennard-Jones 势的车辆跟驰动力学特性及模型[J].吉林大学学报(工学版),2022,52(11):2549-2557.  
QU Dayi,ZHAO Zixu,JIA Yanfeng,et al. Car-following dynamics characteristics and model based on Lennard-Jones potential[J].Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2022,52(11):2549-2557.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)