

基于 UKF 车辆状态及路面附着系数估计的 AFS 控制

周兵^{1,2}, 邱香², 吴晓建^{1†}, 龙乐飞¹

(1. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082;
2. 江西科技学院 协同创新中心, 江西 南昌 330098)

摘要: 本文侧重于主动前轮转向(Active Front Steering, AFS)控制系统的应用性与可行性研究, 针对紧急转向工况下轮胎呈现强非线性问题, 以及 AFS 控制算法中部分状态量难以获取、路面附着系数对车辆稳定性有重要影响但难以直接测量等问题, 设计非线性滑模控制器以综合考虑载荷转移、轮胎非线性及路面条件等对操稳性影响, 同时, 通过 ESP 系统现有的 IMU 传感器测量信息, 运用无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filter, UKF)算法为滑模控制器动态估计车辆状态信息和路面附着系数. 在得到期望轮胎侧偏力后, 通过非线性轮胎模型精确反求所需叠加转角, 以在“轮胎-路面”附着能力范围内检验控制系统的有效性. 最后, 高附着系数情况下的鱼钩测试仿真及低附着系数时的角阶跃转向仿真共同表明, 通过 IMU 与 UKF 结合的状态估计确保了 AFS 控制系统的可行性, 有效提高了车辆操纵稳定性.

关键词: 主动前轮转向; 无迹卡尔曼滤波; 状态观测; 路面附着系数; IMU

中图分类号: U463.1

文献标志码: A

AFS Control Based on Estimation of Vehicle State and Road Coefficient Using UKF Method

ZHOU Bing^{1,2}, QIU Xiang², WU Xiaojian^{1†}, LONG Lefei¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Collaborative Innovation Center, Jiangxi University of Technology, Nanchang 330098, China)

Abstract: This paper mainly focuses on the application and feasibility of the Active Front Steering (AFS) control system. Considering that tire behaves nonlinearly during emergency steering and that the vehicle states involved in the AFS control system and the road adhesion coefficient having important effect on the stability are difficult to measure, a controller using nonlinear sliding mode algorithm was designed to synthetically take into account the influence of load transfer, tire nonlinearity, and road on the vehicle stability. Meanwhile, with the use of signals measured from the existing Inertial Measurement Unit (IMU) sensor of ESP system and the application of Unscented

* 收稿日期: 2018-05-03

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFB0100903-2), National Key R&D Program of China(2016YFB0100903-2); 国家自然科学基金资助项目(51765021), National Natural Science Foundation of China(51765021); 江西科技学院协同创新中心开放基金(16XTK-FYB03, 16XTKEYB04), Open Fund of Collaborative Innovation Center of Jiangxi University of Technology(16XTK-FYB03, 16XTKEYB04)

作者简介: 周兵(1972—), 男, 贵州习水人, 湖南大学教授, 博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: saintwu520@163.com

Kalman Filter (UKF) algorithm, a state estimator was established to dynamically estimate the vehicle state information and road adhesion coefficient for sliding mode controller. On the above basis, the desired superposition angle is precisely reversely calculated by the nonlinear tire model after the desired tire force is obtained, which verifies the effectiveness of the control system over the "tire-road" attachment capability range. Finally, simulations of fishhook test with high road adhesion and step input with low road adhesion indicate that the state estimation combined with IMU and UKF ensures the feasibility of AFS control system and effectively improves the vehicle stability.

Key words: Active Front Steering(AFS); Unscented Kalman Filter(UKF); state estimation; road adhesion coefficient; Inertial Measurement Unit(IMU)

转向系统是人与汽车进行交互的重要子系统,对于传统的转向操纵方式,其控制权限完全来自于驾驶员,但受制于驾驶员自身生理反应速度、驾驶经验与技术等局限,车辆在紧急转向、快速变道等工况存在失稳风险.Kasselmann 等^[1]首先提出了主动前轮转向(Active Front Steering, AFS)概念,在应急工况下,让控制系统分享转向控制权限,通过主动转向电机快速而精确地施加叠加转角的方式,与驾驶员操控形成双输入,有效弥补了上述不足.目前,宝马、奥迪等公司均开发了主动前轮转向控制系统,并推出了相应产品^[2],使 AFS 成为 ESP 外另一项提升车辆操纵稳定性的重要控制技术.

AFS 控制研究主要分为可变传动比控制和稳定性控制,本文重点关注 AFS 系统对车辆稳定性的改善.国内外学者在 AFS 稳定性控制方向开展了大量而深入的研究工作, Ma 等^[3]采用滑模变结构控制方法为 AFS 系统设计了横摆角速度和质心侧偏角双目标控制算法,移线及紧急转向工况的仿真模拟表明,所设计的双目标滑模控制器具有较强的稳定性控制能力. Kim^[4]等认为车辆转向响应受到多种不确定性的影响,如质量、车速和道路状况等,因此将定量反馈理论用于控制器的设计,使其具备一定的鲁棒性.赵治国等^[5]考虑了前后轮侧偏刚度、车速等参数不确定性,采用 H_{∞} 控制算法为 AFS 设计了反馈和前馈结合的控制系统.殷国栋等^[6]采用 μ 综合鲁棒控制方法对主动转向系统进行控制,但出于质心侧偏角难以测量的考虑,控制系统仅取横摆角速度作为反馈变量.陈德玲^[7]等通过状态观测器估计车辆质心侧偏角,为以横摆角速度和质心侧偏角共同反馈的 LQR 控制器提供状态信息,实现车辆稳定性最优控制.以上研究致力于考虑控制系统的不确定性以及多目标最优控制,但大多针对线性系

统,无法反应较大轮胎侧偏角时轮胎力的饱和特性,且忽略了路面附着系数对车辆稳定性的重要影响,难以精确反应极端工况下 AFS 控制系统的有效性.

Aripin 等^[8]考虑了不同路面附着系数的影响,设计了滑模控制器对横摆角速度进行追踪,从而实现 AFS 系统的稳定性控制.田晨等^[9]采用 UKF(Unscented Kalman Filter, UKF)方法设计了路面附着系数观测系统,实时估计路面的附着情况,在此基础上分析了 AFS 系统对行驶在高附着系数路面、低附着系数路面和对开路面的车辆稳定性改善效果,但都未考虑控制算法中涉及的状态变量获取问题,且采用的轮胎模型均为二自由度线性模型.

以上研究对 AFS 控制技术发展做了积极探索和推动作用,但侧重于发展先进的控制策略和算法,对控制算法中涉及的路面附着条件、状态变量等信息的获取则关注不够.需要说明的是,目前有较多的车辆状态观测研究,但少有基于现有车载传感器对轮胎侧向力、路面附着系数等状态量同时开展讨论.此外,AFS 作为应急控制技术,轮胎的强非线性特性需要加以考虑,以在“轮胎-路面”接触作用力可达范围内检验控制系统的可行性和有效性.

综合以上分析,本文将利用 ESP 系统已有的 IMU(Inertial Measurement Unit, IMU)传感器,通过状态估计的软测量技术^[10-11],对控制算法中出现的车辆质心侧偏角、轮胎作用力等状态变量,以及路面附着系数等环境变量进行实时估计,采用滑模变结构控制算法设计车辆横摆角速度和质心侧偏角综合控制系统,同时基于非线性轮胎模型反求得到所需叠加转角,以在“轮胎-路面”耦合的侧向力可达范围内提高车辆的操纵稳定性.

1 动力学建模

1.1 整车动力学模型

考虑车身侧倾对载荷转移的影响,建立包含整车横摆运动、侧向运动及车身侧倾运动的三自由度动力学模型,如图1所示.根据牛顿第二定律,建立公式(1)~(3)所示动力学方程.

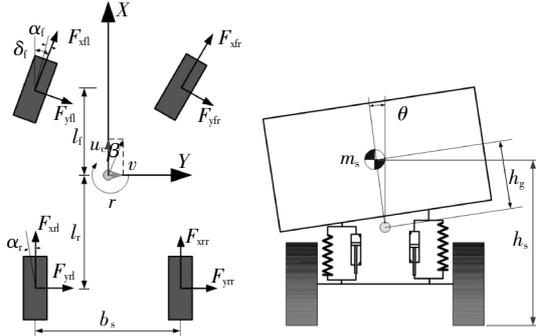


图1 整车三自由度动力学模型

Fig.1 3-DOF dynamics model of the vehicle

三自由度动力学方程:

$$\begin{cases} I_z r' = a \sum_{j_i=\beta, fl, fr} F_{y_j} - b \sum_{j_i=rl, rr} F_{y_j} \\ m(\beta' + r)v_x + m_s h \theta'' = \sum_{j_i=\beta, fl, fr, rl, rr} (F_{y_j} + F_{z_j}) \\ I_\theta \theta'' + C_\theta \theta' + K_\theta \theta = m_s g h \theta + m_s a_s h \end{cases} \quad (1)$$

车轮载荷:

$$\begin{cases} F_{yfl} = \frac{mgb}{2(a+b)} + \frac{(ma_s v_x h_s + K_\theta \theta + C_\theta \theta')b}{b_s(a+b)} \\ F_{yfr} = \frac{mgb}{2(a+b)} - \frac{(ma_s v_x h_s + K_\theta \theta + C_\theta \theta')b}{b_s(a+b)} \\ F_{yrl} = \frac{mga}{2(a+b)} + \frac{(ma_s v_x h_s + K_\theta \theta + C_\theta \theta')b}{b_s(a+b)} \\ F_{yrr} = \frac{mga}{2(a+b)} - \frac{(ma_s v_x h_s + K_\theta \theta + C_\theta \theta')b}{b_s(a+b)} \end{cases} \quad (2)$$

轮胎侧偏角:

$$\begin{cases} \alpha_f = (v_y + ar)v_x^{-1} - \delta_f \\ \alpha_r = (v_y - br)v_x^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

公式(1)~(3)中: r 为横摆角速度; β 为质心侧偏角; θ 为车身侧倾角; I_z 和 I_θ 分别为整车横摆转动惯量和车身侧倾转动惯量; m 为整车质量; m_s 为簧载质量; K_θ 为侧倾角刚度; C_θ 为侧倾阻尼; h 为簧载质量质心至侧倾轴线距离; F_{y_j} ($j=fl, fr, rl, rr$)为轮胎侧向力; F_{z_j} 为轮胎垂向载荷; a 和 b 分别为整车质心至前轴和后轴距离; v_x 为车辆纵向行驶速度,本文取 v_x 为定值; a_s 为车辆侧向加速度, $a_s=(\beta'+r)v_x$; h_s 为整车

质心高度; δ_f 为驾驶员输入产生的车轮转角; α_f 和 α_r 分别为前轴和后轴的轮胎侧偏角.

1.2 含路面附着系数的非线性轮胎模型

车辆垂向动力学与侧向动力学通过轮胎作用力相互耦合,转向过程中,内、外侧的车轮载荷转移将引起两侧轮胎侧向力的变化;同时,考虑到高速应急转向时轮胎侧向力表现出强非线性特性和饱和特性,以及轮胎侧向力还应受到路面附着条件的约束,本文采用魔术公式轮胎模型^[12-13]以综合反应上述特征.

$$F_y = \mu D_y \sin\left\{\frac{5-\mu}{4}\right\} C_y \arctan[(2-\mu)B_y \alpha (1-E_y) + E_y \arctan((2-\mu)B_y \alpha)] \quad (4)$$

式中: α 为轮胎侧偏角(deg); F_z 为车轮载荷(kN); B_y 为刚度因子; C_y 为形状因子; D_y 为峰值因子; E_y 为曲率因子; B_y 、 C_y 、 E_y 均与车轮载荷有关.定义 $B_{lateral}$ 如下:

$$B_{lateral} = a_3 \sin(a_4 \arctan(a_4 F_z)) \quad (5)$$

与轮胎相关的各系数可由下式得到:

$$\begin{cases} D_y = a_1 F_z^2 + a_2 F_z \\ E_y = a_6 F_z^2 + a_7 F_z + a_8 \\ B_y = B_{lateral} / (C_y D_y) \end{cases} \quad (6)$$

魔术公式轮胎模型中的参数 $a_1 \sim a_8$ 参照文献[12]给出结果,如表1所示.将公式(2)和(3)带入公式(4),即可获得实时的轮胎侧向作用力.

表1 魔术公式轮胎模型参数值^[13]

Tab.1 Magic formula tire model parameters^[13]

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	C_y
-22.1	1 011	1 078	1.82	0.208	0	-0.35	0.707	1.3

2 采用滑模算法的AFS稳定性控制器

文献[14-15]表明,过于追求理想横摆角速度跟踪,可能导致质心侧偏角的恶化.本文综合考虑横摆角速度和质心侧偏角的控制需求,根据横摆角速度和质心侧偏角的控制误差,为滑模控制算法构造如下滑模面.

横摆角速度控制滑模面:

$$S_r = r - r_d + \lambda_r \int (r - r_d) dt \quad (7)$$

质心侧偏角滑模面:

$$S_\beta = \beta - \beta_d \quad (8)$$

综合滑模面:

$$S = S_r + \lambda_\beta S_\beta \quad (9)$$

式中: λ_r 为正的加权系数; λ_β 为两个滑模面的调节系数, 可将其设置为动态时变, 以根据工况需求加以调整, 因其中涉及相关调节机理研究, 本文暂将 λ_β 取值为 1; r_d 和 β_d 分别为理想横摆角速度和理想质心侧偏角, 如公式(10)所示, 两者由线性二自由度模型在稳态转向工况计算得到, 且同时受到路面附着系数约束。

$$\begin{cases} r_d = \operatorname{sgn}\left(\frac{v_x/L}{1+Kv_x^2}\delta_f\right) \times \min\left(\left|\frac{v_x/L}{1+Kv_x^2}\delta_f\right|, \left|\frac{0.85\mu g}{v_x}\right|\right) \\ \beta_d = \operatorname{sgn}\left(\frac{b+mv_x^2}{K_f L}\delta_f\right) \times \min\left(\left|\frac{b+mv_x^2}{K_f L}\delta_f\right|, \arctan(0.02\mu g)\right) \\ K = \frac{m}{L^2} \left(\frac{a}{2K_r} - \frac{b}{2K_f}\right) \end{cases} \quad (10)$$

式中: L 为车辆轴距; K_f 和 K_r 为前轮和后轮线性侧偏刚度; sgn 为符号函数。

对综合滑模面求导, 得到:

$$S' = \sum_{j_i=\beta, r} F_{y_j} \left(\frac{a}{I_z} + \frac{1}{mv_x}\right) - \sum_{j_i=r, r'} F_{y_j} \left(\frac{b}{I_z} + \frac{1}{mv_x}\right) + (\lambda_r - 1)r - \lambda_r r_d - r_d' - \beta_d' \quad (11)$$

令 $S' = 0$, 得到等效前轴轮胎侧向力控制率:

$$F_{y_f, eq} = \frac{\sum_{j_i=r, r'} F_{y_j} \left(\frac{b}{I_z} - \frac{1}{mv_x}\right) + r_d' - (\lambda_r - 1)r - \lambda_r r_d + \beta_d'}{\left(\frac{a}{I_z} + \frac{1}{mv_x}\right)} \quad (12)$$

为使控制系统在噪声干扰及参数不确定时也能保持稳定, 且尽量减小滑模控制抖动现象, 加入饱和函数得:

$$F_{y_f} = F_{y_f, eq} - k_0 \operatorname{sat}(S/\varepsilon) \quad (13)$$

式中: k_0 为大于零的常数; $\operatorname{sat}(x)$ 为饱和函数, 表达式为:

$$\operatorname{sat}(S/\varepsilon) = \begin{cases} S/\varepsilon & \text{if } |S| \leq \varepsilon \\ \operatorname{sgn}(|S| - \varepsilon) & \text{else} \end{cases} \quad (14)$$

式中: ε 为边界厚度, $\varepsilon > 0$, 调节 ε 值, 可改善抖动问题。

为检验控制系统的稳定性, 为滑模控制器设计李雅普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2} S^2 \geq 0 \quad (15)$$

对李雅普诺夫函数求导, 得到:

$$V' = \begin{cases} -k_0 \left(\frac{a}{I_z} + \frac{1}{mv_x}\right) S \cdot \operatorname{sgn}(S/\varepsilon) & |S/\varepsilon| > 1 \\ -k_0 \left(\frac{a}{I_z} + \frac{1}{mv_x}\right) S^2/\varepsilon & |S/\varepsilon| \leq 1 \end{cases} \quad (16)$$

公式(16)满足 V' , 由此可知, 所设计的控制系统渐近稳定。

计算得到理想 F_{y_f} 值后, 最终目标是为了得到 AFS 系统控制输入, 即主动电机的叠加转角 $\Delta\delta_f$ 。考虑轮胎的非线性特性及其与路面共同决定的附着能力, $\Delta\delta_f$ 的求解通过轮胎逆模型获取, 一种方法是在知道当前载荷 F_z 的情况下, 查表获取理想车轮侧偏角 α_d , 然后计算理想侧偏角 α_d 与当前车轮侧偏角 α_f 的差值, 即 $\Delta\delta_f = \alpha_d - \alpha_f$, 该方法速度快, 但精度差; 另一种方法是根据轮胎模型 $F_y = f(\alpha, F_z)$, 通过非线性方程反求理想车轮侧偏角 α_d , 即 $\alpha_d = f^{-1}(F_y, F_z)$ 。本文主要目的在于检验 AFS 控制系统对操稳性的改善能力, 即以可行性检验为目的, 故采用准确度高反求方法对叠加转角进行精确求解。

3 UKF 状态观测器及路面附着系数估计

如公式(7)~(13)所示, AFS 稳定性控制系统需要获取车辆横摆角速度 r 、后轴轮胎侧向力 F_{yrl} 和 F_{yrr} 、车辆质心侧偏角 β , 以及路面附着系数 μ 等状态信息。然而, 这些状态量, 或因测量成本高, 如轮胎力的测量需要价格昂贵的六分力仪, 或因无法直接测量, 如路面附着系数等, 导致通过传感器直接测量的方式难以在车辆中普及应用。本文采用无迹卡尔曼滤波方法构建状态观测系统, 视路面附着系数及轮胎侧向力满足马尔科夫过程, 从而将它们推广至状态变量中; 同时, 通过 ESP 系统中配备的 IMU 传感器测量车身侧倾角速度、横摆角速度和车辆侧向加速度等状态, 由 ESP 系统配备的转向角传感器得到车轮转角输入, 动态估计滑模控制算法中所需的状态信息。

取状态变量:

$$X = [\beta, r, \theta, \theta', \mu, \mu', F_{yfl}, F_{yfr}, F_{yrl}, F_{yrr}]^T$$

$$\text{量测量: } Y = [a_y, r, \theta']^T$$

$$\text{待估计量: } \hat{X} = [\hat{\beta}, \hat{r}, \hat{\theta}, \hat{\theta}', \hat{\mu}, \hat{\mu}', \hat{F}_{yfl}, \hat{F}_{yfr}, \hat{F}_{yrl}, \hat{F}_{yrr}]^T$$

以上观测系统状态方程可由公式(1)~(6)推导得到。设三自由度车辆动力学系统的状态噪声和量测噪声均为高斯白噪声, 且方差矩阵分别为 Q 和 R , UKF 状态观测系统的算法如下所示^[15-16]。

1) 设状态量的初始值和方差

$$\hat{X}_0 = E(X_0) \quad (17)$$

$$P_0 = E((X_0 - \hat{X}_0)(X_0 - \hat{X}_0)^T) \quad (18)$$

2)计算 Sigma 点

设 n 维状态变量在 k 时刻的最优估计为 $X_{k|k}$, 对应的协方差矩阵为 $P_{k|k}$, 则 Sigma 的计算为:

$$\begin{cases} \chi_k = X_{k|k} + \sqrt{nP_{k|k}} \\ \chi_{n+k} = X_{k|k} - \sqrt{nP_{k|k}} \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

3)状态预测更新

对上文建立的三自由度车辆运动学模型, 通过四阶龙格-库塔离散方法进行离散得到:

$$X_{k+1} = f(X_k, u_k, t_k) \quad (20)$$

通过离散方程对 Sigma 点进行非线性无迹变化:

$$\chi_{k+1|k} = f(\chi_k, u_k, t_k) \quad (21)$$

对 $\chi_{k+1|k}$ 进行合并, 得到 $k+1$ 时刻的先验估计:

$$X_{k+1|k} = \sum_{k=1}^{2n} \frac{1}{2n} \chi_{k+1|k} \quad (22)$$

先验估计误差的协方差为:

$$P_{X_{k+1|k}} = \sum_{k=1}^{2n} \frac{1}{2n} (\chi_{k+1|k} - X_{k+1|k})(\chi_{k+1|k} - X_{k+1|k})^T + Q_{k-1} \quad (23)$$

4)量测预测更新

由量测方程对各 Sigma 点进行无迹变换:

$$\psi_{k+1|k} = h(\chi_k, u_k, t_k) \quad (24)$$

通过合并得到系统下一步的预测量测值:

$$Z_{k+1|k} = \sum_{k=1}^{2n} \frac{1}{2n} \psi_{k+1|k} \quad (25)$$

预测量测值的协方差为:

$$P_{Z_{k+1|k}} = \sum_{k=1}^{2n} \frac{1}{2n} (\psi_{k+1|k} - Z_{k+1|k})(\psi_{k+1|k} - Z_{k+1|k})^T + R_k \quad (26)$$

先验估计和量测估计的协方差为:

$$P_{X_{k+1|k} Z_{k+1|k}} = \sum_{k=1}^{2n} \frac{1}{2n} (\chi_{k+1|k} - X_{k+1|k})(\psi_{k+1|k} - Z_{k+1|k})^T \quad (27)$$

滤波器的增益矩阵为:

$$K_{k+1} = P_{X(k+1|k)Z(k+1|k)} / P_{Z(k+1|k)} \quad (28)$$

系统的后验估计为:

$$X_{k+1|k+1} = X_{k+1|k} + K_{k+1}(Z_{k+1} - Z_{k+1|k}) \quad (29)$$

状态量后验方差矩阵为:

$$P_{k+1|k+1} = P_{k+1|k} + K_{k+1} P_{Z_{k+1|k}} K_{k+1}^T \quad (30)$$

根据设计的量测量和输入量, 以及公式(17)~(30)所示的算法, 完成车辆关键状态量和路面附着系数的估计, 状态观测系统的估计效果将在下一节

中的仿真案例中与控制效果一同展示。

至此, 本文所提出的 AFS 系统控制流程可总结为图 2 所示, 即由 IMU 传感器测量车辆横摆角速度、侧向加速度和车身侧倾角速度, 作为 UKF 状态观测系统的量测量, 转向盘转角传感器测量获取车轮转角, 作为 UKF 状态观测系统输入, 动态估计路面附着系数、后轴轮胎侧向力、前轮侧偏角、质心侧偏角及其变化率等状态, 为滑模控制算法提供实时信息, 进而决策出期望的前轴轮胎侧向力, 再经相应的非线性求解器得到附加车轮转角的精确数值解。

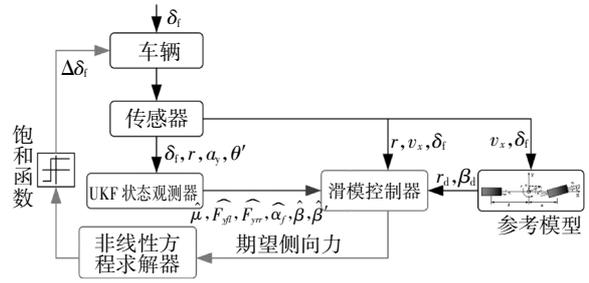


图 2 AFS 控制系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of AFS control system

4 仿真与分析

本文将以高附着系数($\mu = 0.8$)路面上进行鱼钩测试仿真, 以及低附着系数($\mu = 0.3$)路面上进行方向盘角阶跃输入仿真, 以验证控制系统的有效性。两种工况下的行驶车速均为 60 km/h, 对应的转向角输入曲线如图 3 所示。

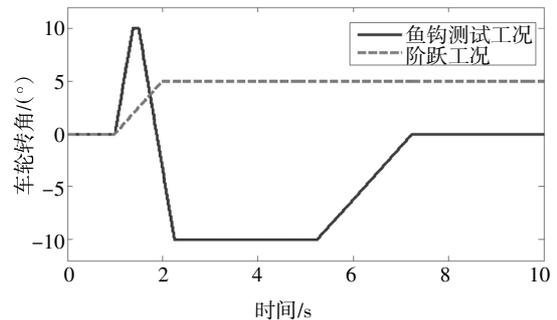


图 3 车轮转角

Fig.3 Steering angle

图 4 所示观测结果显示, 在车辆转向阶段, UKF 状态观测系统能够比较准确地估计路面附着系数; 图 5 和图 6 共同表明, 质心侧偏角、前轮侧偏角和后轴轮胎侧向力等状态量的估计值与真实值吻合度高, 准确地为控制系统提供信息保障。

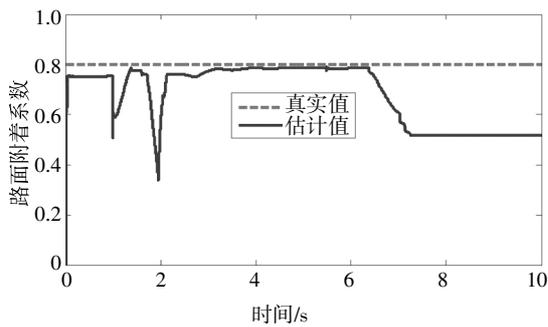
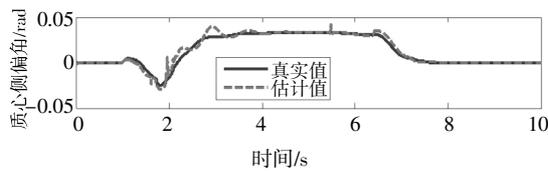
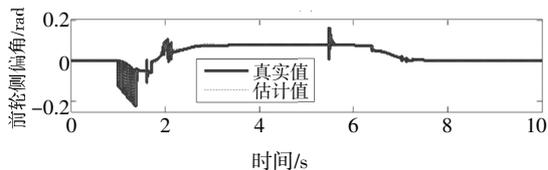


图4 路面附着系数估计

Fig.4 Estimation of road adhesion coefficient



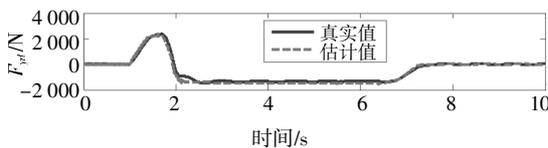
(a)质心侧偏角



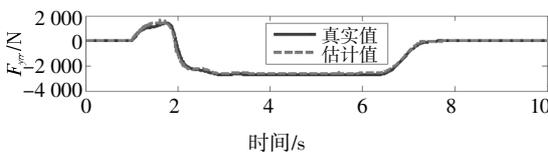
(b)前轮侧偏角

图5 鱼钩测试工况车辆状态估计对比1

Fig.5 Comparison I of vehicle state estimation for fishhook test



(a)后轴左侧轮胎侧向力



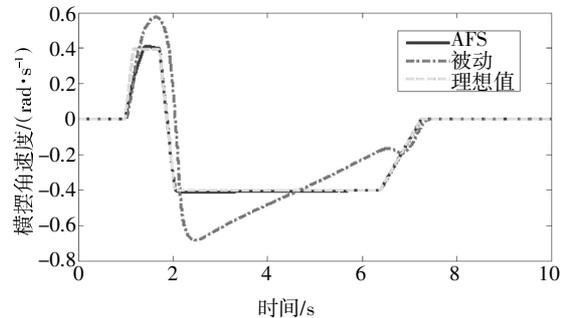
(b)后轴右侧轮胎侧向力

图6 鱼钩测试工况车辆状态估计对比2

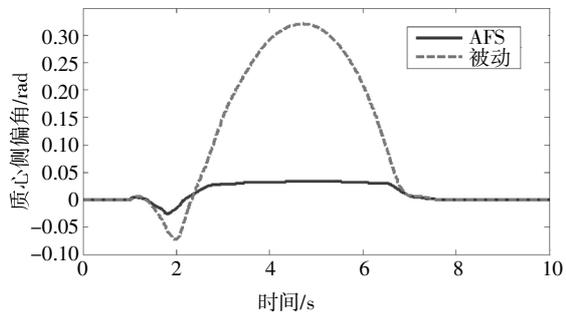
Fig.6 Comparison II of vehicle state estimation for fishhook test

从图7可以发现,所设计的 AFS 控制系统有效地跟踪了车辆理想横摆角速度,大幅减少了横摆和质心侧偏角的超调;图8(a)则显示车辆的“质心侧偏角-质心侧偏角速度”相平面轨迹被约束在很小的一个范围内,提高了车辆的操纵稳定性;图8(b)中,3条曲线上的点对应于鱼钩测试工况方向盘转

角恢复至直行状态(第 7.25 s)时的轨迹点,从中可知,在转向阶段,AFS 系统的介入使车辆行驶轨迹更加贴近理想状态,改善了车辆的操纵性。



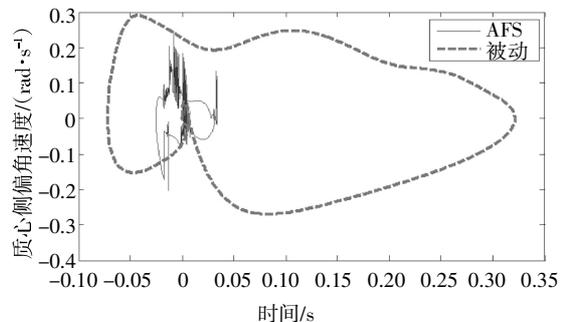
(a)横摆角速度



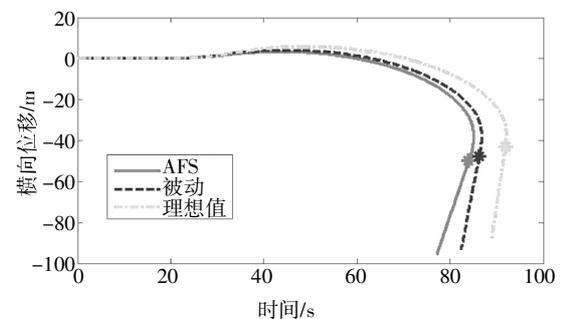
(b)质心侧偏角

图7 鱼钩测试工况下有无 AFS 控制的结果对比 1

Fig.7 Results comparison I of vehicle state estimation for fishhook test with/without AFS control



(a)质心侧偏角相平面



(b)行驶轨迹

图8 鱼钩测试工况下有无 AFS 控制的结果对比 2

Fig.8 Results comparison II of vehicle state estimation for fishhook test with/without AFS control

图 9 为方向盘角阶跃输入工况下的路面附着系数估计结果,结合图 3 的转向角时域输入曲线可知,在进入转向阶段后,UKF 观测系统快速而准确地估计了路面的附着信息;图 10 和图 11 同样验证了阶跃输入工况下 UKF 观测系统的准确性,图中,观测曲线与真实值曲线基本重合。

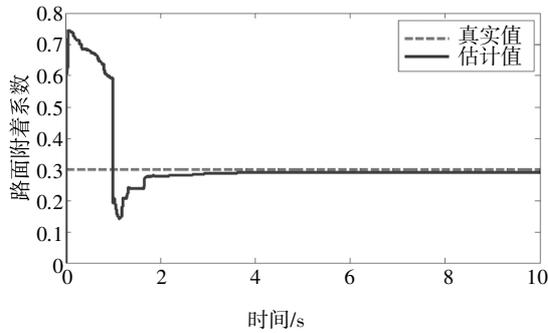
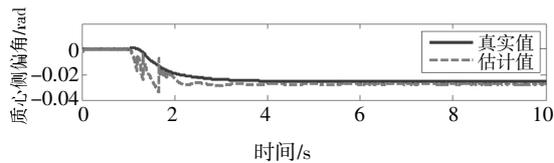
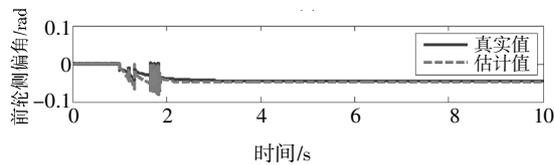


图 9 路面附着系数估计

Fig.9 Estimation of road adhesion coefficient



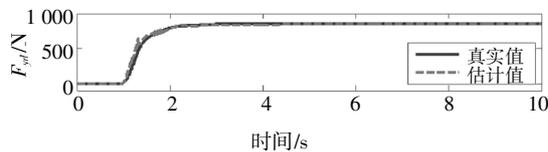
(a)质心侧偏角



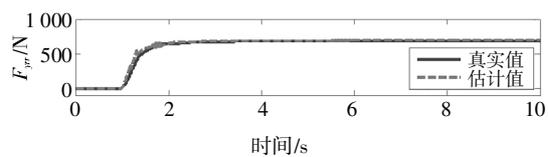
(b)前轮侧偏角

图 10 阶跃输入工况车辆状态估计对比 1

Fig.10 Comparison I of vehicle state estimation for step input mode



(a)后轴左侧轮胎侧向力



(b)后轴右侧轮胎侧向力

图 11 阶跃输入工况车辆状态估计对比 2

Fig.11 Comparison II of vehicle state estimation for step input mode

从图 12~图 13 所示的车辆横摆角速度及质心侧偏角响应可以发现,AFS 控制抑制了车辆的横摆超调,有效减小了车辆质心侧偏角,使车辆快速进入稳态,且良好地跟踪期望的参考值;图 14 的轨迹曲线则表明,基于状态观测的 AFS 控制系统使车辆几乎沿着理想的轨迹行进,提高车辆稳定性的同时,也保持了良好的操纵性。

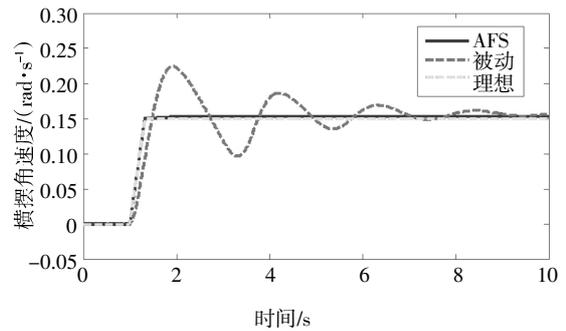
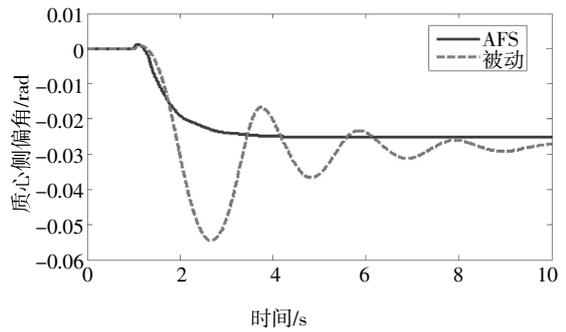
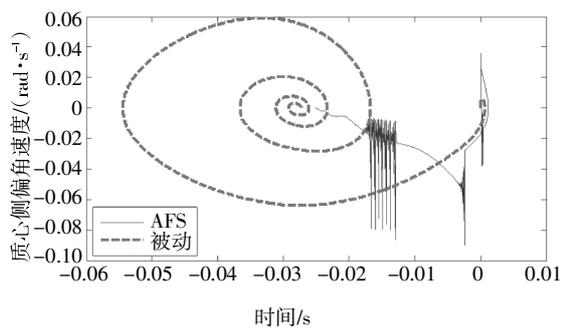


图 12 横摆角速度对比

Fig.12 Comparison of yaw rate



(a)质心侧偏角



(b)质心侧偏角相平面

图 13 阶跃输入工况结果对比

Fig.13 Results comparison of step input condition

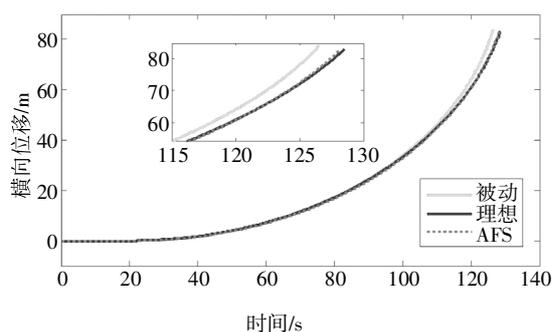


图 14 行驶轨迹对比

Fig.14 Comparison of driving trajectories

5 结论

1)建立了非线性三自由度动力学模型,采用滑模控制算法,设计了横摆角速度和质心侧偏角稳定性控制器;针对控制算法所需的车辆状态和路面附着系数,通过 ESP 系统配置的 IMU 传感器,将横摆角速度、侧向加速度及侧倾角速度等为量测量,采用了 UKF 方法设计了状态观测系统,动态估计了车辆关键状态和路面附着系数,为控制系统的运行提供信息保障。

2)考虑垂向载荷与轮胎非线性特性对车辆操纵性的影响,采用包含路面附着信息的魔术公式轮胎模型,在滑模控制器计算得到期望的前轴轮胎侧向力的基础上,通过对非线性轮胎模型逆向反求,准确地获取所需的叠加车轮转角,在考虑了路面和轮胎相互接触所能提供的附着能力约束的情况下,检验了控制系统的可行性。

参考文献

- [1] KASSELMANN J T, KERANEN T W. Adaptive steering[J]. Bendix Technical Journal, 1969, 2(3): 26—35.
- [2] KIM S, KWAK B, CHUNG S, *et al.* Development of an active front steering system [J]. International Journal of Automotive Technology, 2006, 7(3): 315—320.
- [3] MA X, WONG P K, ZHAO J, *et al.* Multi-objective sliding mode control on vehicle cornering stability with variable gear ratio actuator-based active front steering systems[J]. Sensors, 2016, 17: 49—65.
- [4] ZHANG J, KIM J, XUAN D, *et al.* Design of active front steering (AFS) system with QFT control[J]. International Journal of Automotive Technology, 2008, 9(6): 695—702.
- [5] 赵治国, 余卓平, 孙泽昌. 车辆主动前轮转向 H_{∞} 鲁棒控制系统研究[J]. 汽车工程, 2005, 27(4): 442—446.
ZHAO Z G, YU Z P, SUN Z C. A study on H_{∞} robust control for vehicle active front wheel steering system [J]. Automotive Engineering, 2005, 27(4): 442—446. (In Chinese)
- [6] 殷国栋, 陈南, 李普. 基于 μ 综合鲁棒控制的四轮转向车辆操纵稳定性研究[J]. 中国工程科学, 2005, 7(4): 54—58.
YIN G D, CHEN N, LI P. Handling stability for four-wheel steering vehicle based on μ synthesis robust control [J]. Engineering Sciences, 2005, 7(4): 54—58. (In Chinese)
- [7] 陈德玲, 殷承良, 陈俐. 基于状态观测器的主动前轮转向研究[J]. 中国机械工程, 2005, 7(4): 54—58.
CHEN D L, YIN C L, CHEN L. Study on active front steering based on state-space observer [J]. China Mechanical Engineering, 2005, 7(4): 54—58. (In Chinese)
- [8] ARIPIN M K, GHAZALI R, SAM Y M, *et al.* Uncertainty modelling and high performance robust controller for active front steering control[C]// Control Conference. IEEE, 2015: 1—6.
- [9] 周兵, 田晨, 宋义彤, 等. 基于路面附着系数估计的 AFS 控制策略研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(4): 16—22.
ZHOU B, TIAN C, SONG Y T, *et al.* Control strategy of AFS based on estimation of tire-road friction coefficient [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(4): 16—22. (In Chinese)
- [10] HONG S, LEE C, BORRELLI F, *et al.* A novel approach for vehicle inertial parameter identification using a dual Kalman filter [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(1): 151—161.
- [11] BOLANDHEMMAT H. Distributed sensing and observer design for vehicles state estimation [D]. Waterloo: University of Waterloo, 2009.
- [12] PACEJKA H. Tire and vehicle dynamics [M]. Oxford: Elsevier, 2005.
- [13] 范璐. 基于轮胎力估计的汽车 EPS 和 AFS 集成控制研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
FAN L. Research on integrated control strategy of electric power steering and active front steering based on the estimation of tire forces[D]. Changsha: Hunan University, 2014. (In Chinese)
- [14] 赵树恩, 李以农, 郑玲, 等. 基于滑模控制理论的车辆横向稳定性控制[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(8): 1—5.
ZHAO S E, LI Y N, ZHENG L, *et al.* Vehicle lateral stability control based on sliding model control [J]. Journal of Chongqing University (Natural Sciences), 2007, 30(8): 1—5. (In Chinese)
- [15] WU X, ZHOU B, WEN G, *et al.* Intervention criterion and control research for active front steering with consideration of road adhesion[J]. Vehicle System Dynamics, 2017(2): 1—26.
- [16] 西蒙. 最优状态估计: 卡尔曼 H_{∞} 及非线性滤波[M]. 张勇刚, 李宁, 奔粤阳译. 北京: 国防工业出版社, 2013.
DAN S. Optimal state estimation: Kalman H_{∞} and nonlinear approaches [M]. Translator: ZHANG Y G, LI N, BEN Y Y. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. (In Chinese)