DOI: 10.3901/JME.2015.16.050

四驱混合动力轿车分布式卡尔曼车速估计*

赵治国 杨 杰 吴泉威

(同济大学新能源汽车工程中心 上海 201804)

摘要: 四驱混合动力轿车存在两轮/四轮多种驱动模式, 针对某一驱动模式所设计车速估计算法难以满足其他模式下车速估计的精度。考虑车辆不同驱动模式, 利用车载传感器信号、后轮轮毂电机转矩信息以及既定档位下前轮转矩信息, 提出两级分布式卡尔曼车速估计方法。考虑模型的强非线性, 采用无味卡尔曼滤波(Unscented Kalman filter, UKF)算法设计主/子滤波器。同时为了提高 UKF 算法对模型误差、信号干扰的鲁棒性, 实现了量测噪声均值和方差的自适应调节。基于 Untire 轮胎模型和滑移率递推方程, 设计滑移率子滤波器; 基于整车运动学模型, 设计车速主滤波器; 考虑不同驱动模式, 利用子滤波器估计值在线融合得到车速。搭建 Carsim-Simulink 联合仿真平台, 并分别在纯电动驱动模式和四轮混合驱动模式下, 对车速估计算法进行仿真验证。结果表明, 所提出的两级分布式卡尔曼车速估计方法能有效提高车速估计精度, 并增强了对模型误差、量测信号干扰和不同驱动模式的鲁棒性。

关键词: 四驱混合动力轿车; 车速估计; 分布式滤波结构; 自适应无味卡尔曼滤波算法

中图分类号: U270

Vehicle Speed Estimation Based on Distributed Kalman Filter for Four Wheel Drive Hybrid Electric Car

ZHAO Zhiguo YANG Jie WU Xiaowei

(Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804)

Abstract: The driving mode of hybrid electric car can be two-wheel or four-wheel drive. The speed estimation designed for a specific driving mode can hardly achieve high estimated accuracy in all modes. Focus on the changeable driving mode, a kind of distributed Kalman filter with two levels is proposed, by means of utilize vehicle sensors signals, the driving torque of rear in-wheel motors and the torque of front driving wheels at the given gear state. Considering the strongly nonlinear of the model, UKF is adopted to design the filter, and to improve the filter's robustness on modeling error and signal noise, measurement noise mean and covariance is self-adaptive. Firstly, based on UniTire Model and recursive equation of slip rate, the sub-filter is developed; secondly, based on the vehicle Kinematics model, the master-filter can be developed; at last, in consideration of different driving modes, a more accurate velocity estimation is obtained by fusing information from each sub-filters. With the help of Carsim and Simulink, the simulation platform about four wheel drive hybrid electric car is developed, and the proposed speed estimation algorithm is tested on this platform under the pure electric drive mode and the hybrid drive mode. The results show that the proposed algorithm has not only high precision, but also strong robustness on modeling error, measurement noise and the changeable driving mode.

Key words: four-wheel drive hybrid electric car; vehicle speed estimation; distributed filter structure; self-adaptive unscented Kalman filtering algorithm

0 前言

准确实时地获得车辆的行驶状态, 是汽车主动安全系统进行有效控制的前提, 其中利用既有车载传感器量测信号估计纵向车速是其重要环节。所用的传感器信息越少, 车速估计算法就越复杂, 也很

难保证估计精度^[1]。传统防抱死制动系统(Anti-lock braking system, ABS)一般利用 4 个轮速传感器信号, 采用最大最小轮速法或自适应斜率法来估计纵向车速, 但均有其局限性^[2]。随着电子稳定程序(Electric stability program, ESP)逐渐成为现代轿车的标配, 采用轮速和纵向加速度信号估计纵向车速的方法已得到充分研究。吴利军等^[3]通过对实车试验数据离线拟合, 得到加速度静态偏差变化率与加速度变化率之间的线性方程, 基于该线性方程和车

* 国家重点基础研究发展计划资助项目(973 计划, 2011CB711200)。20140828 收到初稿, 20141116 收到修改稿

辆运动学关系,设计卡尔曼滤波在线估计加速度静态偏差和纵向车速。褚文博等^[4]提出了稳态工况加速度、轮速卡尔曼滤波和瞬态工况加速度积分的纵向车速估计算法。近年来,针对四轮独立驱动电动汽车驱动轮转矩和转速可准确获得的特点,宗新怡等^[5]基于美国公路安全研究所(Highway Safety Research Institute, HSRI)轮胎模型和 3 自由度车辆模型,设计 UKF 算法估计纵向车速和侧向车速。褚文博等^[6]基于魔术公式和非线性动力学模型,设计无味粒子滤波算法对纵向车速、质心侧偏角、横摆角速度及各轮侧向力进行联合观测。

四驱混合动力轿车,前轮发动机、起动发电机(Integrated starter generator, ISG)驱动,后轮轮毂电机驱动。后轮驱动转矩可测,既定档位下前轮驱动转矩推算可得。充分利用车辆多动力源、多信息源的特点,论文考虑车速估计的非线性,采用 UKF 算法,并通过量测噪声均值和方差的自适应,设计了两级分布式卡尔曼车速估计器。首先,基于 Untire 半经验轮胎模型和车轮滑移率递推公式,设计了轮胎滑移率子滤波器;其次,考虑整车运动学特性,设计了车速主滤波器,针对不同驱动模式,通过信息融合,得到纵向车速。最后,利用 Carsim-Simulink 联合仿真平台,对所设计车速估计算法进行了多种工况下的仿真验证。

1 两级分布式车速估计架构及模型

1.1 车速估计器架构

图 1 为四驱混合动力轿车分布式卡尔曼车速估计器结构,其中估计器输入包括:车辆加速度信号 $\tilde{a}_x$ 、四轮转速信号 ω_i 和四轮转矩信号 $\tilde{T}_i$ 。 $\tilde{a}_x$ 精度较高,工作可靠,但由于静态偏差导致累计车速误差,适合作为参考系统信号。对于四轮,由 $\tilde{T}_i$ 、 ω_i 确定轮胎纵向力,进而推算出滑移率,最终也可确定车速。该方法精度较低,但不存在车速累计误差,适合作为子系统。

图 1 分布式卡尔曼车速估计器

参考系统输出信号 $\tilde{a}_x$ 和各子系统输出信号一

起构成子滤波器。子滤波器利用带有噪声的加速度信号、转矩信号以及轮速信号,估计得到各轮胎滑移率;继而通过滑移率公式和轮胎模型还原计算得到轮心速度 $\hat{v}_{xi}$ 、轮胎纵向力 $\hat{F}_{xi}$;最终输入主滤波器,主滤波器通过计算比例因子,对各轮心速度融合得到估计车速。

当车辆处于前轮驱动、后轮驱动、四轮驱动等不同模式时,前、后轮胎滑移状态不同,对应各滑移率估计器估计精度会有所差异。主滤波器根据轮胎纵向力在线调整各估计器比例因子,增大精度高的估计器权重,降低精度低的估计器权重,使估计车速可靠且精度较高。

1.2 滑移率估计器

加速工况时,轮胎滑移率定义为

$$s = \frac{R_d \omega - u_w}{R_d \omega} \quad (1)$$

式中, s 为轮胎滑移率; R_d 为车轮滚动半径; ω 为车轮角速度; u_w 为轮心速度。

根据式(1),建立滑移率递推公式

$$s_k = \frac{\omega_{k-1}}{\omega_k} s_{k-1} + \frac{\omega_k - \omega_{k-1}}{\omega_k} - \frac{(\tilde{a}_{x,k-1} - q_{k-1})t_s}{\omega_k R_d} \quad (2)$$

式中, $\tilde{a}_{x,k}$ 为车辆纵向加速度观测量; q_k 为加速度噪声; t_s 为采样间隔;下标 k 为采样时刻。

纯纵滑工况,统一轮胎模型简化为

$$\begin{cases} \Phi_x = \frac{K_x s}{\mu_{x0} F_z} \\ \bar{F} = 1 - \exp\left(-|\Phi_x| - E_1 \Phi_x^2 - \left(\frac{1}{12} + E_1^2\right)|\Phi_x^3|\right) \\ F_x = \frac{\Phi_x}{|\Phi_x|} \mu_x F_z \bar{F} \end{cases} \quad (3)$$

式中, K_x 、 μ_{x0} 为纵向特性参数; E_1 为侧向特性参数; μ_x 为路面附着系数; F_z 为轮胎垂向力; F_x 为轮胎纵向力。根据式(3),在特定路面,当轮胎垂直载荷已知时,建立轮胎纵向力函数

$$F_x = h(s) \quad (4)$$

车轮驱动转矩,通过转动方程,得到轮胎纵向力,作为滤波器观测量。

$$\tilde{F}_{x,k} = \frac{\tilde{T}_k - I_\omega a_{\omega,k}}{R_d} = \frac{(T_k + \theta_{T,k}) - I_\omega a_{\omega,k}}{R_d} = F_{x,k} + \theta_k \quad (5)$$

式中, $\tilde{F}_{x,k}$ 为轮胎纵向力观测量; $\tilde{T}_k$ 为车轮转矩观测量; I_ω 为车轮转动惯量; $a_{\omega,k}$ 为车轮角加速度; T_k 为车轮转矩真实值; $\theta_{T,k}$ 为车轮转矩真实值与测量值误差; θ_k 为轮胎纵向力真实值与测量值误差;

下标 k 为采样时刻。

1.3 主滤波器

不考虑车辆垂直、俯仰以及侧倾运动, 假设车辆左、右转向轮转角相同, 可将整车简化成四轮 3 自由度模型, 包括纵向、横向和横摆运动, 如图 2 所示。

图 2 四轮 3 自由度车辆模型

图 2 中, d_1 、 d_2 为车辆前后轮距; L_f 、 L_r 为前后轮到质心距离; δ 为车轮转角; r 为车辆横摆角速度; v_{xi} 、 v_{yi} ($i=1, 2, 3, 4$) 为车轮轮心坐标系下纵向速度和侧向速度; v_x 、 v_y 为车辆纵向速度和侧向速度。

根据运动学方程, 建立轮心速度与车速关系

$$\begin{cases} v_{x1} = (v_x - d_1 r / 2) \cos \delta + (v_y + L_f r / 2) \sin \delta \\ v_{x2} = (v_x + d_1 r / 2) \cos \delta + (v_y + L_f r / 2) \sin \delta \\ v_{x3} = v_x - d_2 r / 2 \\ v_{x4} = v_x + d_2 r / 2 \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6), 分别利用前后轮心速度得到车速

$$\begin{cases} v_x = (v_{x1} + v_{x2}) / (2 \cos \delta) - (v_y + L_f r / 2) \tan \delta \\ v_x = (v_{x3} + v_{x4}) / 2 \end{cases} \quad (7)$$

式中, v_y 、 r 不可知, 计算时忽略这两项的影响。

因此, 由前轮轮心速度所推算的车速含有侧向运动和横摆运动所引起的偏差。

CARLSON^[7-8]采用子滤波器方差来调整联邦卡尔曼滤波器比例因子。一般驱动力越大, 子滤波器误差也越大, 文中拟采用驱动力代替方差调节比例因子, 并引入车轮转角信号以减小转弯工况时前轮轮心速度的权重。

$$\begin{cases} F_g^{-1} = \frac{1}{(F_{x1} + F_{x2})(1 + |\tan \delta|)} + \frac{1}{(F_{x3} + F_{x4})} \\ v_x = \frac{F_g(v_1 + v_2)}{2 \cos \delta (F_{x1} + F_{x2})(1 + |\tan \delta|)} + \frac{F_g(v_3 + v_4)}{2(F_{x3} + F_{x4})} \end{cases} \quad (8)$$

式中, F_{xi} ($i=1, 2, 3, 4$) 分别表示左前轮、右前轮、左后轮和右后轮纵向力。

2 噪声自适应 UKF 设计

卡尔曼滤波(Kalman filter, KF)应用于噪声统计特性已知的线性系统可以得到最小方差估计。扩展卡尔曼滤波(Extend Kalman filter, EKF)是具有其一阶近似精度的非线性高斯滤波器, 但对强非线性系统滤波精度偏低, 并且需要计算雅可比矩阵, 要求系统方程和测量方程连续可微。UKF 是 JULIER 等^[9-10]在 20 世纪 90 年代提出的一种非线性高斯滤波器。UKF 继承了 KF 的基本结构, 但 UKF 不要求解雅可比矩阵, 而是基于无味变换进行状态误差传播。理论上, 无味变换至少能够以三阶泰勒精度逼近任何非线性高斯系统状态的后验均值和协方差^[11]。

在实际应用过程中, 考虑到系统模型和观测模型存在误差或参数变动。此外, 系统过程噪声和量测噪声的均值和协方差也难以获得, 甚至噪声统计特性是时变的。因此, 参数自适应和噪声自适应的卡尔曼滤波算法得到了应用^[1], 其基本思想为利用状态预测误差以及新息信息, 在线估计系统噪声和测量噪声。

式(4)所示的观测方程具有较强的非线性, 并且观测方程难以求解雅可比矩阵。因此采用 UKF 算法设计滤波器。此外, 观测模型不准确所导致误差以及转矩测量误差, 均可看成观测噪声。本文假设观测噪声均值、方差时变, 采用限定记忆指数加权噪声自适应算法在线估计观测噪声的均值和方差^[12], 考虑到同时对过程噪声和观测噪声调节的自适应算法鲁棒性较差, 容易导致滤波不稳定^[11], 设定过程噪声是均值为 0, 方差时不变的高斯白噪声。

噪声自适应无味卡尔曼滤波算法具体步骤如下所述。

(1) 状态方程离散化。定义状态量 $x_k = s_k$, 控制输入量 $u_{k-1} = (\omega_k, \omega_{k-1}, \tilde{a}_{k-1})^T$, 观测量 $z_k = \tilde{F}_{x,k}$, 重写系统方程式(2)和测量方程式(5), 得到

$$\begin{cases} x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) + \Gamma(q_{k-1}, u_{k-1}) \\ z_k = h(x_{k-1}) + \theta_k \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\Gamma(q_{k-1}, u_{k-1}) = (q_{k-1} t_s) / (\omega_k R_d)$, $f(x_{k-1}, u_{k-1})$ 为式(2)等号右侧剩余部分。

假设噪声 q_k 和 θ_k 服从如下统计特性

$$\begin{cases} E(q_k) = 0 & E(q_k, q_k) = Q_k \\ E(\theta_k) = \bar{\theta}_k & E(\theta_k, \theta_k) = \Theta_k \\ E(q_k, \theta_k) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

(2) 初始化滤波器。在许多情况下, 初始状态

是一个随机变量。采用初始状态的统计特性初始化滤波器是最优的。

$$\begin{cases} \hat{x}_0 = E(x_0) \\ P_0 = E[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)] \end{cases} \quad (11)$$

实际过程中, 初始误差方差 P_0 选取过大会导致估计初期振荡, 选取过小则导致收敛速度变慢。通常 P_0 主对角线上值选取比较大些。

(3) Sigma 点采样。根据上一时刻的状态值和误差方差, 按照对称采样策略, 生成 Sigma 点和权重系数^[13-14]

$$\xi_{k-1} = [\hat{x}_{k-1}, \hat{x}_{k-1} \pm (\sqrt{(n+\kappa)P_{k-1}})] \quad (12)$$

$$W_i^m = W_i^c = \begin{cases} \kappa/(n+\kappa) & i=0 \\ 1/[2(n+\kappa)] & i=1,2,\dots,L \end{cases} \quad (13)$$

式中, n 为状态维数, $L=2n+1$, κ 为比例系数, 取 $n+\kappa=3$ 可以减少预测误差。

(4) 时间更新。利用式(9)中系统方程, 对 Sigma 点 ξ_{k-1} 更新得到预测 Sigma 点 $\gamma_{k|k-1}$, 结合对应的加权系数计算状态量预测值的均值和方差。考虑过程噪声均值为 0, $\Gamma(\bullet)=0$, 故

$$\gamma_{i,k|k-1} = f(\xi_{i,k-1}, u_{k-1}) \quad i=0,1,\dots,L \quad (14)$$

$$\hat{x}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^L W_i^m \gamma_{i,k|k-1} \quad (15)$$

$$P_{k|k-1} = \sum_{i=0}^L W_i^c (\gamma_{i,k|k-1} - \hat{x}_{k|k-1})(\gamma_{i,k|k-1} - \hat{x}_{k|k-1}) + Q_{k-1} \quad (16)$$

式中, $\xi_{i,k-1}$ 、 $\gamma_{i,k|k-1}$ 为 ξ_{k-1} 、 $\gamma_{k|k-1}$ 的第 i 个元素。

(5) 量测噪声自适应及量测更新。利用预测观测值与测量值误差, 基于限定记忆指数加权噪声自适应算法, 在线估计观测噪声的均值和方差, 然后进行量测更新。

设定时间窗口为 m , 遗忘因子为 b , 则记忆系数

$$d_m = \frac{1-b}{1-b^m} \quad 0 < m < k \quad 0 < b < 1 \quad (17)$$

量测噪声均值估计为

$$\begin{cases} \hat{\theta}_k = b\hat{\theta}_{k-1} + d_m A_k^\theta - d_m b^m A_{k-m}^\theta \\ A_j^\theta = z_j - \sum_{i=0}^L W_i^c h(\gamma_{i,j|j-1}) \end{cases} \quad (18)$$

式中, A_k^θ 、 A_{k-m}^θ 由 A_j^θ 取 k 、 $k-m$ 时刻得到。

带量测噪声估计均值的预测观测值计算如下

$$\chi_{i,k|k-1} = h(\gamma_{i,k|k-1}) + \hat{\theta}_k \quad i=0,1,\dots,L \quad (19)$$

$$\hat{z}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^L W_i^m \chi_{i,k|k-1} \quad (20)$$

量测噪声方差估计如下

$$\varepsilon_j = z_j - \hat{z}_{j|j-1} \quad (21)$$

$$A_j^\theta = \varepsilon_j \varepsilon_j - \sum_{i=0}^L W_i^c (\chi_{i,j|j-1} - \hat{z}_{j|j-1})(\chi_{i,j|j-1} - \hat{z}_{j|j-1}) \quad (22)$$

$$\hat{\theta}_k = b\hat{\theta}_{k-1} + d_m A_k^\theta - d_m b^m A_{k-m}^\theta \quad (23)$$

式中, A_k^θ 、 A_{k-m}^θ 由 A_j^θ 取 k 、 $k-m$ 时刻得到。

自协方差和互协方差计算如下

$$P_{z,k} = \sum_{i=0}^L W_i^c (\chi_{i,k|k-1} - \hat{z}_{k|k-1})(\chi_{i,k|k-1} - \hat{z}_{k|k-1}) + \hat{\theta}_k \quad (24)$$

$$P_{xz,k} = \sum_{i=0}^L W_i^c (\gamma_{i,k|k-1} - \hat{x}_{k|k-1})(\chi_{i,k|k-1} - \hat{z}_{k|k-1}) \quad (25)$$

滤波更新如下

$$\begin{cases} \hat{x}_k = \hat{x}_{k|k-1} + K_k(z_k - \hat{z}_{k|k-1}) \\ K_k = \frac{P_{xz,k}}{P_{z,k}} \\ P_k = P_{k|k-1} - K_k P_{z,k} K_k \end{cases} \quad (26)$$

至此, k 时刻限定记忆指数加权量测噪声均值方差自适应 UKF 设计完毕。

3 仿真实验

下文利用 Carsim 和 Simulink 建立四驱混合动力轿车联合仿真平台; 在低附着路面进行混合动力模式、纯电动模式的转向盘角阶跃输入仿真, 在高附着路面进行混合动力模式的双移线工况仿真; 并且对仿真结果进行分析说明。

3.1 Carsim-Simulink 联合仿真平台

图 3 为 Carsim-Simulink 联合仿真平台结构, 其中控制逻辑模块采用四驱混合动力轿车实车控制程序。车辆加速时, 该模块根据踏板位置 P_A 以及发动机和电机状态等, 计算出发动机转矩 T_E 、ISG 电机

图 3 Carsim-Simulink 联合仿真平台

转矩 T_{ISG} 和轮毂电机转矩 T_{MC} 。动力传动系统一方面产生发动机、ISG 电机转矩, 并且执行离合器分离结合指令 S_C 、变速器换挡指令 S_G , 将转矩传递到前轮转矩 T_F ; 另一方面, 轮毂电机转矩直接传递给后轮转矩 T_R 。Carsim 模型包括车身、轮胎、悬架、转向系统、路面等模型。

3.2 低附路面转向盘角阶跃输入工况

分别在混合动力模式和纯电动模式下, 选用转向盘阶跃输入试验进行算法验证。试验工况如下: 在附着系数为 0.4 的湿滑路面, 车辆从静止加速到目标车速 40 km/h 后, 然后以 $300^\circ/\text{s}$ 的速度转动转向盘到 90° 。仿真时, 设定加速度传感器噪声均值为 0.05 m/s^2 , 均方差为 0.1 m/s^2 ; 前轮转矩噪声均值为 $0 \text{ N}\cdot\text{m}$, 均方差为 $10 \text{ N}\cdot\text{m}$; 后轮转矩噪声均值为 $0 \text{ N}\cdot\text{m}$, 均方差为 $5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。对不含噪声的加速度积分, 得到实际车速; 对加入噪声的加速度信号积分, 得到加速度积分车速。

图 4 为混合动力模式转向盘角阶跃输入仿真结果。图 4b 中的实线为 1 时表示离合器分离, 细线为 3 时表示离合器接合。图 4c 和图 4d 中, 为了便于分辨曲线, 只画出了左前轮和右后轮轮速, 及其对应子滤波器估计结果。表 1 给出了四个子滤波器以及主滤波器的误差统计特性。

表 1 混合动力模式车速估计结果 m/s

误差统计特性	滤波器				
	左前轮	右前轮	左后轮	右后轮	主滤波器
均值	-0.069 0	-0.013 4	-0.074 3	-0.018 6	-0.047 2
方均根	0.001 9	0.002 3	0.001 9	0.002 3	0.001 9
最大值	0.749 2	0.749 6	-0.361 1	-0.361 0	0.335 6

图 4b 中, 混合动力模式加速工况下, 变速器档位出现切换, 传动比不断降低, 离合器分离接合状态也随之变化。图 4c 中, 在档位切换过程中, 前轮受到转矩冲击, 轮速出现尖峰, 轮胎滑移率较大, 图 4d 中对应子滤波器估计精度降低。但后轮为轮毂电机驱动, 不存在换挡冲击, 没有轮速尖峰, 轮胎滑移率较小。主滤波器融合各子滤波器估计值, 最终估计结果精度仍然较高。

图 4d 中, 在车辆开始转向后, 由于车辆横摆运动和侧向运动对车辆纵向运动的影响, 子滤波器出现估计偏差, 但主滤波器降低了各子滤波的估计偏差, 使得最终估计偏差较小。

图 4d 中, 直接对加速度传感器信号进行积分, 由于传感器存在静态误差, 从而导致加速度积分误差不断增大。但由于各滤波器引入转矩信息, 各车速估计器可以有效抑制加速度累计误差。

图 5 为纯电动模式转向盘角阶跃输入仿真结

图 4 混合动力模式转向盘角阶跃输入

果。图 5b 中, 纯电动加速工况下, 变速器传动比不断降低, 但离合器始终处于分离状态。由于前轮为非驱动轮, 后轮为轮毂电机驱动, 因此没有转矩冲击, 轮胎滑移率小。由图 5d 和表 2 可知, 各子滤波器以及主滤波器估计结果都较好。主滤波器能够减小各子滤波由于车辆转向导致的估计偏差, 使得最终估计偏差较小。各个滤波器也可以有效抑制加速度累计误差。

表 2 纯电动模式车速估计结果 m/s

误差统计特性	滤波器				
	左前轮	右前轮	左后轮	右后轮	主滤波器
均值	-0.064 2	-0.025 3	-0.104 0	-0.066 0	-0.047 0
方均根	0.000 5	0.001 3	0.001 0	0.001 8	0.000 8
最大值	-0.100 6	-0.099 6	-0.197 5	-0.198 1	0.113 5

图5 纯电动模式转向盘角阶跃输入

3.3 高附路面双移线工况

在混合动力驱动模式下，进行双移线工况仿真。设定车速为 60 km/h，路面附着系数为 0.8，通过闭环控制跟踪目标路线。

表3 双移线工况车速估计结果 m/s

误差统计	滤波器				
	左前轮	右前轮	左后轮	右后轮	主滤波器
均值	-0.004 7	-0.004 1	-0.000 6	-0.000 6	-0.001 3
方均根	0.001 0	0.001 1	0.001 1	0.001 1	0.000 4
最大值	0.225 2	-0.235 0	0.231 8	-0.244 1	-0.140 2

图6为混合动力模式双移线工况仿真结果。图6b中，变速器传动比没有切换，离合器一直处于结合状态，因此没有换挡转矩冲击。但由于车辆横摆

运动和侧向运动的影响，各个子滤波器估计结果存在差异。主滤波器利用式(8)对各个子滤波器估计值进行融合，也可以在转弯工况时取得较好的纵向车速估计精度。

图6 混合动力模式双移线工况

4 结论

(1) 针对四驱混合动力轿车，考虑其后轮驱动转矩可测，前轮驱动转矩可推算，建立基于轮胎模型和滑移率递推方程的车速子估计器。

(2) 针对各子滤波器噪声统计特性时变、不可知，采用限定记忆指数加权噪声自适应算法在线估计观测噪声的均值和方差。

(3) 针对车辆存在两轮/四轮驱动模式, 驱动工况复杂多变, 建立融合各子滤波估计结果的车速估计主滤波器。

(4) 搭建四驱混合动力轿车车速估计 Carsim-Simulink 联合仿真平台, 其集成了动力控制逻辑、动力传动系统以及 Carsim 中车身、轮胎、悬架、转向、路面等模型。

后续将探讨制动工况, 制动转矩不可测的情况下, 分布式卡尔曼车速估计器的应用, 研究带路面参数(附着系数、道路坡度)和车辆参数(质量、转动惯量)识别的车速自适应估计算法。

参 考 文 献

- [1] 余卓平, 高晓杰. 车辆行驶过程中的状态估计问题综述[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 20-33.
YU Zhuoping, GAO Xiaojie. Review of vehicle state estimation problem under driving situation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 20-33.
- [2] 郑太雄, 单荣明, 蒋国英, 等. 汽车 ABS 参考车速的确定方法[J]. 汽车技术, 2010(3): 37-40.
ZHENG Taixiong, SHAN Rongming, JIANG Guoying, et al. The method to determine automotive ABS reference speed[J]. Automobile Technology, 2010(3): 37-40.
- [3] 吴利军, 王丽芳. 一种基于加速度及轮速信息的参考车速估计方法[J]. 汽车技术, 2011(1): 45-48.
WU Lijun, WANG Lifang. A method of speed estimation based in acceleration and wheel speed information[J]. Automobile Technology, 2011(1): 45-48.
- [4] 褚文博, 李深, 江青云, 等. 基于多信息融合的全轮独立电驱车辆车速估计[J]. 汽车工程, 2012(11): 962-966.
CHU Wenbo, LI Shen, JIANG Qingyun, et al. Speed estimation for all-wheel drive vehicle based on multi-information fusion[J]. Automobile Engineering, 2012(11): 962-966.
- [5] 宗新怡, 李刚, 邓伟文. 四轮独立驱动电动汽车车速估计研究[J]. 机械设计与制造, 2013(9): 83-85.
ZONG Xinyi, LI Gang, DENG Weiwen. Study on velocity estimation for four-wheel independent drive electric vehicle[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(9): 83-85.
- [6] 褚文博, 罗禹贡, 陈龙, 等. 分布式电驱车辆的无味粒子滤波状态参数联合观测[J]. 机械工程学报, 2013, 49(24): 117-127.
CHU Wenbo, LUO Yugong, CHEN Long, et al. Vehicle state estimation by unscented particle filter in distributed electric vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(24): 117-127.
- [7] CARLSON N A. Federated filter for fault-tolerant integrated navigation systems[C]//IEEE Position Location and Navigation Symposium. Orlando, 1988: 110-119.
- [8] CARLSON N A. Federated square root filter for decentralized parallel processors[J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 1990, 26(3): 517-525.
- [9] JULIER S J, UHLMANN J K, DURRANT-WHYTE H F. A new approach for filtering nonlinear systems[C]//American Control Conference, Proceedings of the 1995. IEEE, 1995, 3: 1628-1632.
- [10] JULIER S J, UHLMANN J K. A general method for approximating nonlinear transformations of probability distributions[R]. Oxford: Robotics Research Group, Department of Engineering Science, University of Oxford, 1996.
- [11] 赵琳. 非线性系统滤波理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
ZHAO Lin. Nonlinear system filtering theory[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [12] 赵琳, 王小旭, 孙明, 等. 基于极大后验估计和指数加权的自适应 UKF 滤波算法[J]. 自动化学报, 2010, 36(7): 1007-1019.
ZHAO Lin, WANG Xiaoxu, SUN Ming, et al. Adaptive UKF filtering algorithm based on maximum a posterior estimation and exponential weighting[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(7): 1007-1019.
- [13] 潘泉, 杨峰, 叶亮, 等. 一类非线性滤波器——UKF 综述[J]. 控制与决策, 2005, 20(5): 481-489.
PAN Quan, YANG Feng, YE Liang, et al. Survey of a kind of nonlinear filter-UKF[J]. Control and Decision, 2005, 20(5): 481-489.
- [14] JULIER S J, UHLMANN J K. A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems[J]. SPIE, 1997, 3068: 182-193.

作者简介: 赵治国, 男, 1971 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为车辆动力学控制、混合动力汽车系统集成控制及新型传动系统控制。发表论文 100 余篇。

E-mail: zhiguo.zhao@tongji.edu.cn