DOI: 10.3901/JME.2020.16.204

分布式电动汽车状态与参数无迹卡尔曼滤波估计*

宋义彤^{1,2} 舒红宇^{1,2} 陈仙宝^{1,2} 靖长青^{1,2} 郭成^{1,2}

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400044;

2. 重庆大学汽车工程学院 重庆 400044)

摘要: 为提高分布式电动汽车的控制性能, 提出一种更加综合、全面的车辆状态及参数估计方法。针对车辆在行驶过程中某些动力学状态及参数难以实时量测的问题, 以分布式电驱动汽车为研究对象, 探讨基于无迹卡尔曼滤波的车辆状态估计及参数识别方法。建立7自由度时变参数车辆模型; 以车辆易于测量的纵向加速度、侧向加速度、横摆角速度和轮速为观测变量, 通过状态扩维, 将车辆相关参数引入到车辆状态矢量中, 采用无迹卡尔曼滤波算法设计一种车辆状态和参数的联合观测器, 以便同时估计和辨识车辆纵向速度、侧向速度、轮胎侧向力、车辆质量、转动惯量、质心位置及其高度; 在 Simulink/Carsim 平台上进行鱼钩角输入、滑行和加速工况的仿真验证, 结果表明, 该联合观测器能够有效的估计和辨识出上述相关车辆状态和参数, 收敛效果较好。

关键词: 无迹卡尔曼滤波; 观测器; 估计; Simulink/Carsim

中图分类号: U461

State and Parameters Estimation for Distributed Drive Electric Vehicle Based on Unscented Kalman Filter

SONG Yitong^{1,2} SHU Hongyu^{1,2} CHEN Xianbao^{1,2} JING Changqing^{1,2} GUO Cheng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044;

2. School of Automotive Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract: In order to improve the control performance of distributed drive electric vehicle (EV) a more comprehensive vehicle state and parameter estimation method is proposed. For the problem that it is difficult to measure the vehicle states and parameters in real time, the distributed EV is considered as the object, and a method of vehicle states and parameters estimation based on unscented Kalman filter (UKF) is discussed. Firstly, the 7-DOF time-varying parameter vehicle model is established; secondly, taking the longitudinal acceleration, lateral acceleration, yaw angular velocity and wheel speed which are easy to be measured as the measured variables, a combined observer of vehicle states and system parameters is designed using the UKF algorithm to estimate longitudinal velocity, lateral velocity, lateral tire forces, vehicle mass, center position and inertia moment by extending the dimension of state variables. Finally, the combined observer is simulated and analyzed on Simulink/Carsim platform. The results show that the observer can estimate vehicle state and system parameters effectively, and has a good convergence effect.

Key words: unscented Kalman filter; observer; estimation; Simulink/Carsim

0 前言

随着汽车电子技术的发展, 为了提高车辆的稳定性, 避免事故的发生, 越来越多的主动安全系统被广泛应用于汽车, 比如制动防抱死系统、电子稳定性系统和主动前轮转向等^[1]。但是, 一套稳定可

靠的控制系统不仅在于控制算法的鲁棒性, 还依赖于车辆状态及参数的准确获取。不同于传统燃油汽车, 由于分布式电驱动汽车通过四个驱动电机可以实现独立驱动, 车辆的质量、转动惯量及质心位置的变化直接影响到车辆行驶状态的变化, 而驱动电机的响应与车辆状态及参数息息相关。例如, 当车辆质量和质心位置变化时, 车辆转向过程中横向载荷转移量会发生变化, 此时, 四个轮胎的侧向力也会随之变化, 而驱动电机的效率 MAP 特性与电机的转速和转矩密切相关, 且在当前车速下所能提供

* 国家自然科学基金(51975069)、重庆市自然科学基金(cstc2018jcyjAX0077)和重庆市研究生科研创新(CYB18059)资助项目。20190829 收到初稿, 20200226 收到修改稿

的最大转矩受限于轮胎的摩擦椭圆特性, 所以分布式电驱动汽车需要更加精确的车辆状态及参数, 故对分布式电驱动汽车状态及参数的实时估计和辨识尤显重要。由于技术制约^[2]无法直接测量车辆状态或通过传感器方式测量的价格较为昂贵, 因此有必要通过软测量或估计的方法来获取车辆实时状态及参数。如今, 企业及高校对车辆状态及参数估计已经开展了诸多研究, 如文献[3-5]分别对车辆的轮胎力、质心侧偏角及侧向速度进行了有效的估计。但是, 上述研究均未考虑车辆参数的识别, 比如车辆质量、转动惯量、质心位置及高度等, 而车辆参数是车辆主动安全控制器的设计基础, 直接影响到控制器的实施效果, 其响应变化常会引起控制发散、不收敛现象的发生, 进而导致严重的交通事故。

可见, 对车辆参数的辨识也同等重要。BDADA等^[6]提出了一种双卡尔曼滤波方法来估计并辨识了车辆侧倾角、道路坡度和轮胎侧偏刚度、悬架刚度、横摆转动惯量和质心高度。WIELITZKA等^[7]设计了一种无迹卡尔曼滤波(UKF)观测器来估计车辆质心侧偏角、车辆质量和转动惯量以提高控制精度。KANGHYUN^[8]通过侧向轮胎力传感器估计了车辆的侧向速度和轮胎的侧偏刚度。JIANG等^[9]采用经典卡尔曼滤波设计了一种观测器, 有效辨识出了车辆质量、侧倾刚度和质心位置。HONG等^[10]设计了双卡尔曼滤波算法估计了车辆质量、转动惯量和质心位置, 但未考虑质心高度的影响。白艳等^[11]通过试验数据, 结合非线性最小二乘法拟合了车辆的横摆转动惯量和轮胎的侧偏刚度。LIN等^[12]设计了平行通道卡尔曼观测器以此估计了车辆的质心侧偏角、车辆质量、横摆转动惯量和质心位置。综上所述, 上述文献通过多种方法对车辆参数进行了有效识别, 但是所采用的方法对参数较多、非线性较强的系统难以实现有效估计, 并且在车辆参数估计时, 考虑的车辆状态及参数较少。车辆质量直接影响横摆转动惯量、质心位置及高度、侧向载荷转移, 进而影响轮胎侧向力, 最终影响车辆的速度、加速度、横摆角速度和质心侧偏角等表征车辆状态的变量。可见, 在对车辆参数进行辨识的同时, 还需要对车辆状态进行估计, 故需要设计车辆状态及参数的联合观测器。解少博等^[13]通过 UKF 算法对车辆的多个状态参数进行了估计和辨识, 但是该文献同时选取了车辆质心至前后轴的距离作为状态变量。

卡尔曼滤波观测器可以根据系统噪声和量测噪声的协方差, 实时估算观测器的反馈矩阵, 并对噪声进行抑制或滤波。卡尔曼滤波算法可分为容积卡尔曼滤波(Cubature Kalman filter, CKF)、扩展卡尔曼

滤波(Extended Kalman filter, EKF)和无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman filter, UKF)。其中, CKF 仅适用于线性系统, 当系统为非线性时, 会出现较大的误差, 甚至观测结果会发散; EKF 通过对非线性系统进行离散化处理, 将其转化为线性系统, 采用 CKF 框架来处理非线性系统的观测问题; UKF 对非线性函数的概率密度分布进行近似, 具有无需求解 Jacobian 矩阵、计算精度高和稳定性高的优点。考虑到本文系统模型为多维数、强非线性系统, 本文选用 UKF 算法对车辆的状态和参数进行联合估计。

论文以分布式电驱动汽车为研究对象, 考虑到车辆质量变化引起转动惯量、质心位置及高度的变化, 选取质心到前轴和后轴的距离两者中的一个作为变量, 通过扩维状态向量, 将车辆质量、横摆转动惯量、质心到前轴的距离和质心高度等车辆参数扩维至状态矢量中, 并通过 UKF 算法设计了一种能够同时估计车辆状态和辨识车辆参数的联合观测器, 研究技术框架如图 1 所示。

图1 技术框架图

1 车辆动力学模型

车辆动力学建模是状态估计和参数辨识的对象和基础, 本文仅考虑了车辆转向过程中的横向载荷转移, 采用 7 自由度车辆动力学模型。

1.1 时变参数车体动力学模型

车辆在运行过程中, 车辆承载变化会引起车辆质量、转动惯量、质心位置及高度等车辆参数的变化, 尤其对于重型载货车辆而言, 簧上质量的变化幅度尤为显著。车辆参数的变化还会影响到车辆状态变化, 进而直接影响到车辆控制系统的性能, 严重时会导致车辆失稳。为了能够表征车辆固有参数及状态的变化, 本文建立了时变参数车辆动力学模

型,如图2所示。

图2 时变参数车辆动力学模型

车辆在纵向、侧向及横摆三个方向的时变参数动力学模型如式(1)~(3)所示

$$m(t)a_x(t) = [F_{x1}(t) + F_{x2}(t)]\cos\delta + F_{x3}(t) + F_{x4}(t) - [F_{y1}(t) + F_{y2}(t)]\sin\delta \quad (1)$$

$$m(t)a_y(t) = [F_{x1}(t) + F_{x2}(t)]\sin\delta + F_{y3}(t) + F_{y4}(t) + [F_{y1}(t) + F_{y2}(t)]\cos\delta \quad (2)$$

$$I_{zz}(t)\dot{w}_r(t) = a(t)[F_{x1}(t) + F_{x2}(t)]\sin\delta - b(t)[F_{y3}(t) + F_{y4}(t)] + a(t)[F_{y1}(t) + F_{y2}(t)]\cos\delta + 0.5t_f[F_{y1}(t) - F_{y2}(t)]\sin\delta + 0.5t_r[F_{x2}(t) - F_{x1}(t)]\cos\delta + 0.5t_r[F_{x4}(t) - F_{x3}(t)] \quad (3)$$

式中, m 为车辆质量, w_r 为横摆角速度, F_{xi} 和 F_{yi} 分别为轮胎的纵向力和侧向力($i=1, 2, 3, 4$ 分别代表左前轮、右前轮、左后轮、右后轮), a 和 b 分别为质心到前后轴的距离, t_f 和 t_r 分别为前后轴轮距, I_{zz} 为车辆绕 Z 轴的转动惯量, δ 为前轮转角输入, a_x 和 a_y 分别为车辆的纵向加速度和侧向加速度, 其表示为

$$\begin{cases} a_x(t) = \dot{v}_x(t) - v_y(t)w_r(t) \\ a_y(t) = \dot{v}_y(t) + v_x(t)w_r(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中, v_x 和 v_y 是车辆的纵向速度和侧向速度。

车辆在转向过程中存在横向载荷转移, 由式(5)可得

$$\begin{cases} F_{z1} = \frac{mgb}{2L} - \frac{ma_xh}{2L} - \frac{ma_ybh}{Lt_f} + \frac{ma_xa_yh^2}{gLt_f} \\ F_{z2} = \frac{mgb}{2L} - \frac{ma_xh}{2L} + \frac{ma_ybh}{Lt_f} - \frac{ma_xa_yh^2}{gLt_f} \\ F_{z3} = \frac{mga}{2L} + \frac{ma_xh}{2L} - \frac{ma_yah}{Lt_r} + \frac{ma_xa_yh^2}{gLt_r} \\ F_{z4} = \frac{mga}{2L} + \frac{ma_xh}{2L} + \frac{ma_yah}{Lt_r} - \frac{ma_xa_yh^2}{gLt_r} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $L=a+b$ 。

车辆轮胎侧偏角

$$\begin{cases} \alpha_{fl} = \delta - \arctan((v_y + aw_r)/(v_x - 0.5t_fw_r)) \\ \alpha_{fr} = \delta - \arctan((v_y + aw_r)/(v_x + 0.5t_fw_r)) \\ \alpha_{rl} = \arctan((-v_y + bw_r)/(v_x - 0.5t_rw_r)) \\ \alpha_{rr} = \arctan((-v_y + bw_r)/(v_x + 0.5t_rw_r)) \end{cases} \quad (6)$$

1.2 时变参数车轮动力学模型

时变参数车轮转动动力学模型如图3所示, 其时变参数动力学方程如式(7)所示

$$I_t\dot{w}_{ti}(t) = T_i - F_{xi}(t)R_t \quad (7)$$

式中, I_t 为轮胎的转动惯量, w_{ti} 为轮胎的转动角速度, T_i 为车辆的驱动力矩(正值代表驱动, 负值代表制动), R_t 为轮胎半径。

图3 时变参数车轮转动动力学模型

1.3 轮胎模型

考虑到车辆在高车速、大转角情况下轮胎处于非线性区域, 本文采用魔术轮胎模型^[14], 其名义纵向力和侧向力可通过式(8)计算

$$F^* = D \sin \left\{ C \arctan \left[Bx - E \left(Bx - \arctan(Bx) \right) \right] \right\} \quad (8)$$

式中, x 为轮胎滑移率和侧偏角, B 、 C 、 D 和 E 可参考文献[14]。

在车辆运行过程中, 轮胎的纵向力和侧向力通常是耦合在一起, 且符合摩擦圆的关系, 耦合的纵向力和侧向力通过式(9)可得

$$F_x = -\frac{\sigma_x}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}} F_x^* \quad F_y = -\frac{\sigma_y}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}} F_y^* \quad (9)$$

式中, σ_x 和 σ_y 可参考文献[14]。

2 UKF 观测器设计

2.1 系统方程及观测方程

考虑到车辆在运行过程中, 车辆轴距变化较小, 可看作为定值 L , 所以本文选取质心到前后轴的距离 a 和 b 的其中一个作为状态变量。本文通过引入时变参数车辆动力学模型, 通过扩维状态变量, 将车辆质量、横摆转动惯量、质心到前轴的距离和质

心高度等车辆参数扩维至状态矢量中。

车辆参数变量 x_p 表示为

$$\mathbf{x}_p = (m, a, I_{zz}, h)^T \quad (10)$$

扩维后的状态变量

$$\mathbf{x} = (v_x, v_y, w_r, w_{l1}, w_{l2}, w_{l3}, w_{l4}, F_{y1}, F_{y2}, F_{y3}, F_{y4}, m, a, I_{zz}, h)^T \quad (11)$$

在车辆运行过程中, 车辆参数 x_p 变化较小, 假定车辆参数以一阶高斯-马尔科夫过程处理, 即

$$\dot{\mathbf{x}}_p(t) = \eta(t) \quad (12)$$

联立式(1)~(9)和式(11)作为系统模型

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8, f_9, f_{10}, f_{11}, f_{12}, f_{13}, f_{14}, f_{15})^T \quad (13)$$

式中

$$f_1 = \frac{\begin{bmatrix} [F_{x1}(t) + F_{x2}(t)] \cos \delta + F_{x3}(t) + \\ F_{x4}(t) - [F_{y1}(t) + F_{y2}(t)] \sin \delta \end{bmatrix}}{m(t)} + v_y(t) w_r(t);$$

$$f_2 = \frac{\begin{bmatrix} [F_{x1}(t) + F_{x2}(t)] \sin \delta + F_{y3}(t) + \\ F_{y4}(t) + [F_{y1}(t) + F_{y2}(t)] \cos \delta \end{bmatrix}}{m(t)} - v_x(t) w_r(t);$$

$$f_3 = \frac{\begin{bmatrix} a(t)[F_{x1}(t) + F_{x2}(t)] \sin \delta - b(t)[F_{y3}(t) + F_{y4}(t)] + \\ a(t)[F_{y1}(t) + F_{y2}(t)] \cos \delta + 0.5t_f[F_{y1}(t) - F_{y2}(t)] \sin \delta + \\ 0.5t_f[F_{x2}(t) - F_{x1}(t)] \cos \delta + 0.5t_r[F_{x4}(t) - F_{x3}(t)] \end{bmatrix}}{I_{zz}(t)};$$

$$f_{i+3} = R_i [T_i - F_{xi}(t)] / I_i; f_{j+7} = 0; f_{12} = 0; f_{13} = 0; f_{14} = 0; f_{15} = 0; i=1, 2, 3, 4; j=1, 2, 3, 4。$$

为设计车辆状态及参数联合观测器, 需将车辆状态方程式(13)离散为 $\mathbf{x}(t+1) = F(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))$ 的形式, 本文采用一阶欧拉离散方法进行离散, 即

$$\begin{cases} v_x(t+1) = v_x(t) + f_1 \Delta t \\ v_y(t+1) = v_y(t) + f_2 \Delta t \\ w_r(t+1) = w_r(t) + f_3 \Delta t \\ w_{li}(t+1) = w_{li}(t) + f_{i+3} \Delta t \\ F_{yn}(t+1) = F_{yn}(t) \\ m(t+1) = m(t) \\ a(t+1) = a(t) \\ I_{zz}(t+1) = I_{zz}(t) \\ h(t+1) = h(t) \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{式中, } F_{yn}(t+1) = -\frac{\sigma_y}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}} F_y^*。$$

车辆加速度、横摆转动惯量及轮速容易通过传感器的方式测量, 故选其作为观测变量

$$\mathbf{y}(t) = (a_x(t), a_y(t), w_r(t), w_{li}(t))^T \quad (15)$$

式中

$$a_x(t) = \left\{ \begin{bmatrix} [F_{x1}(t) + F_{x2}(t)] \cos \delta + F_{x3}(t) + \\ F_{x4}(t) - [F_{y1}(t) + F_{y2}(t)] \sin \delta \end{bmatrix} \right\} / m(t);$$

$$a_y(t) = \left\{ \begin{bmatrix} [F_{x1}(t) + F_{x2}(t)] \sin \delta + F_{y3}(t) + \\ F_{y4}(t) + [F_{y1}(t) + F_{y2}(t)] \cos \delta \end{bmatrix} \right\} / m(t);$$

$$w_r(t) = w_r; w_{li}(t) = w_{li}。$$

系统输入为

$$\mathbf{u} = (\delta_f, T_{l1}, T_{l2}, T_{l3}, T_{l4})^T \quad (16)$$

结合式(14)~(16)和 UKF 算法^[15], 即可设计车辆状态及参数联合观测器, 其单步估计原理框架如图4所示。

图4 UKF 单步估计原理框架

UKF 算法单步估计原理如下。

初始化

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}(0|0) = E[\mathbf{x}(0)] \\ P_{xx}(0|0) = E[(\mathbf{x}(0) - \hat{\mathbf{x}}(0|0))(\mathbf{x}(0) - \hat{\mathbf{x}}(0|0))^T] \end{cases}$$

Sigma 点计算及时间更新

$$\sigma_i(k|k) = (\hat{\mathbf{x}}(k|k), \hat{\mathbf{x}}(k|k) + \sqrt{(n+\lambda)P_{xx}(k|k)},$$

$$\hat{\mathbf{x}}(k|k) - \sqrt{(n+\lambda)P_{xx}(k|k)})^T$$

$$\sigma_i(k+1|k) = f(\sigma_i(k|k), \mathbf{u}(k))$$

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k) = \sum_{i=0}^{2n} W_i^m \sigma_i(k+1|k)$$

$$P_{xx}(k+1|k) = \sum_{i=0}^{2n} W_i^c [\sigma_i(k+1|k) - \hat{\mathbf{x}}(k+1|k)] \cdot$$

$$[\sigma_i(k+1|k) - \hat{\mathbf{x}}(k+1|k)]^T + Q$$

$$\begin{aligned}\hat{\sigma}_i(k+1|k) &= \left(\hat{x}(k+1|k), \hat{x}(k+1|k) + \sqrt{(n+\lambda)P_{xx}(k+1|k)}, \right. \\ &\quad \left. \hat{x}(k+1|k) - \sqrt{(n+\lambda)P_{xx}(k+1|k)} \right)^T \\ \hat{Y}_i(k+1|k) &= h(\hat{\sigma}_i(k+1|k)) \\ \hat{y}_i(k+1|k) &= \sum_{i=0}^{2n} W_i^m \hat{Y}_i(k+1|k)\end{aligned}$$

量测更新

$$\begin{aligned}P_{yy}(k+1|k) &= \sum_{i=0}^{2n} W_i^c \left[\hat{Y}_i(k+1|k) - \hat{y}_i(k+1|k) \right] \cdot \\ &\quad \left[\hat{Y}_i(k+1|k) - \hat{y}_i(k+1|k) \right]^T + R \\ P_{xy}(k+1|k) &= \sum_{i=0}^{2n} W_i^c \left[\hat{\sigma}_i(k+1|k) - \hat{x}(k+1|k) \right] \cdot \\ &\quad \left[\hat{Y}_i(k+1|k) - \hat{y}_i(k+1|k) \right]^T \\ K(k+1) &= P_{xy}(k+1|k) P_{yy}^{-1}(k+1|k) \\ \hat{x}(k+1|k+1) &= K(k+1) \left[y(k+1) - \hat{y}(k+1|k) \right] + \\ &\quad \hat{x}(k+1|k) \\ P_{xx}(k+1|k+1) &= -K(k+1) P_{yy}(k+1|k) K(k+1)^T + \\ &\quad P_{xx}(k+1|k)\end{aligned}$$

式中, Q 和 R 分别为系统噪声方差和量测方差。

2.2 系统可观性

对于 n 阶线性定常离散系统

$$\begin{cases} x(k+1) = Gx(k) + Hu(k) \\ y(k) = Cx(k) + Du(k) \end{cases}$$

如果根据有限个采样周期内测量的 $y(0)$, $y(1)$, $\dots$, $y(l)$, 可以唯一的确定出系统的任意状态 x , 则称其可观。

定理: 对于线性离散定常系统, 其状态完全可观的充要条件是其可观性判别矩阵满秩。

考虑到系统方程式(14)和量测方程式(15)为非线性, 为证明可以通过观测变量 y 估计出状态变量 x , 本文进行局部可观性证明^[16-17]。

定义矢量 U 为观测矢量和观测矢量的导数, 即

$$\begin{aligned}U = (y; \dot{y}) &= (a_x, a_y, w_r, w_{t1}, w_{t2}, w_{t3}, w_{t4}, \\ &\quad \dot{a}_x, \dot{a}_y, \dot{w}_r, \dot{w}_{t1}, \dot{w}_{t2}, \dot{w}_{t3}, \dot{w}_{t4})^T\end{aligned}\quad (17)$$

可观性矩阵为矢量 U 的 Jacobian 矩阵, 表示为

$$\begin{aligned}\nabla U &= (\partial U / \partial v_x, \partial U / \partial v_y, \partial U / \partial w_r, \partial U / \partial w_{t1}, \\ &\quad \partial U / \partial w_{t2}, \partial U / \partial w_{t3}, \partial U / \partial w_{t4}, \partial U / \partial F_{y1}, \\ &\quad \partial U / \partial F_{y2}, \partial U / \partial F_{y3}, \partial U / \partial F_{y4}, \partial U / \partial m, \\ &\quad \partial U / \partial a, \partial U / \partial I_{zz}, \partial U / \partial h)\end{aligned}\quad (18)$$

由于 Jacobian 矩阵较为繁琐, 在此不详细列出。从可观性矩阵可以看出 Jacobian 矩阵为满秩矩阵, 即验证了系统的可观性。

3 观测器虚拟试验验证

为验证文中观测器的有效性, 进行了 Simulink 和 Carsim 的联合仿真。在 Simulink/Carsim 平台中搭建了车辆模型和 UKF 观测器数学模型, 车辆模型的参数如表 1 所示。为保证 Carsim 整车模型中的轮胎模型与数学模型统一, 本文忽略轮胎回正力矩的影响, 通过数据导入的方式修改 Carsim 整车模型中的轮胎模型, 修改结果如图 5 所示。车辆以 66.96 km/h 的初速度在路面附着系数为 0.85 的路面上进行幅值为 98° 的鱼钩角输入试验, 转向盘转角输入如图 6 所示。仿真工况设置为如下两种: ① 无加速和制动的滑行工况; ② 每个轮胎施加 50 N·m 的定值转矩加速工况。设定系统噪声 $Q = \text{diag}([10^{-5}; 10^{-5}; 8 \times 10^{-5}; 1; 1; 1; 1; 10^{-5}; 10^{-5}; 10^{-5}; 10^{-5}; 10^{-5}; 10^{-5}; 10^{-5}; 10^{-5}; 10^{-2}; 10^{-11}; 2 \times 10^{-4}; 10^{-11}])$, 量测噪声 $R = \text{diag}([10^{-9}; 10^{-9}; 10^{-9}; 1; 1; 1; 1])$ 。

表 1 车辆仿真参数

参数名称	数值
车辆质量 m / kg	1 416
横摆转动惯量 I_{zz} / (kg · m ²)	1 523
质心至前轴的距离 a / m	1.016
质心至后轴的距离 b / m	1.562
质心高度 h / m	0.54
车轮转动惯量 I_w / (kg · m ²)	0.9
车轮有效半径 R / m	0.31
前轴轮距 t_f / m	1.539
后轴轮距 t_r / m	1.539
转向系传动比 i	17.5
电机额定功率 P / kW	10
电机额定转矩 T / (N · m)	25.6
电机最大功率 $P_{\max}$ / kW	20
电机额定转矩 $T_{\max}$ / (N · m)	66

(a) 轮胎纵向力修改结果

(b) 轮胎侧向力修改结果

图 5 Carsim 轮胎力修改结果

图 6 车辆前轮角阶跃输入

3.1 仿真结果分析

3.1.1 工况 1: 无加速和制动的滑行工况

在转向盘鱼钩角输入、滑行工况下, 由于悬架对质心位置的影响较小, 其主要影响质心高度, 故以初始定值作为质心位置的理论值, 以 Carsim 中得到的质心高度为理论值。观测器估计的车辆状态和辨识的车辆固有参数分别与其理论值进行对比, 如图 7 所示。

(a) 纵向速度实际值与估计值对比

(b) 侧向速度实际值与估计值对比

(c) 侧向力实际值与估计值对比

(d) 车辆参数实际值与估计值对比

图 7 鱼钩角输入、滑行工况下仿真结果对比

当车辆在鱼钩角输入下行驶时, 纵向速度、侧向速度、轮胎侧向力及车辆质量、横摆转动惯量、

质心到前轴的距离和质心高度的 UKF 观测值和 Carsim 实际值的对比如图 7 所示。由图 7a 和图 7b 可知, UKF 观测器对车辆的纵向速度和侧向速度的估计值分别与 Carsim 的实际值较为吻合, 言外之意, 该观测器能够间接、有效地估计出车辆的质心侧偏角。

由图 7c 可知, 车辆在行驶过程中, UKF 观测器能够有效地估计出轮胎侧向力, 但是在第 1 s 和第 2 s 过程中估计的轮胎侧向力有较小的波动, 但是其能够很快逼近其理论值, 分析其波动的原因是由于数学模型忽略了汽车悬架和轮胎滚动阻力, 数学模型的轮胎转动角速度与 Carsim 车辆模型的轮胎转动角速度存在一定的误差。此外, 左前轮和左后轮的侧向力的 UKF 估计值与 Carsim 实际值存在一定的误差, 其原因是由于数学模型忽略汽车悬架的影响, 在计算车辆侧向载荷转移时与实际的载荷转移存在一定的误差, 且数学模型中前轮的左右轮胎侧偏角假设相同, 故在轮胎垂向载荷和侧偏角的复合影响下导致左前轮和左后轮的侧向力的估计值与实际值出现了误差。

由图 7d 可知, UKF 观测器能够辨识出车辆质量、横摆转动惯量、质心位置及高度等车辆参数, 虽然其存在一定的误差, 但是误差相对较小。

3.1.2 工况 2: 50 N·m 定值转矩加速工况

在转向盘鱼钩角输入、加速工况下, 给定每个轮胎转矩为 50 N·m 的定值转矩, 如图 8 所示。由于悬架对质心位置的影响较小, 其主要影响质心高度, 故以初始定值作为质心位置的理论值, 以 Carsim 中得到的质心高度为理论值。观测器估计的车辆状态和辨识的车辆固有参数分别与其理论值进行对比, 如图 9 所示。

当车辆在鱼钩角输入下行驶时, 纵向速度、侧向速度、轮胎侧向力及车辆质量、横摆转动惯量、质心到前轴的距离和质心高度的 UKF 观测值和

图8 轮胎定值转矩输入

(a) 纵向速度实际值与估计值对比

(b) 侧向速度实际值与估计值对比

(c) 侧向力实际值与估计值对比

(d) 车辆参数实际值与估计值对比

图9 鱼钩角输入、加速工况下仿真结果对比

Carsim 实际值的对比如图 9 所示。由图 9a 和图 9b 可知, UKF 观测器对车辆的纵向速度和侧向速度的估计值分别与 Carsim 的实际值较为吻合, 言外之意, 该观测器能够间接、有效地估计出车辆的质心侧偏角。

由图 9c 可知, 车辆在行驶过程中, UKF 观测器能够有效地估计出轮胎侧向力, 但是在第 1 s 和第 2 s 过程中估计的轮胎侧向力有较小的波动, 但是其能够很快地逼近其理论值, 分析其波动的原因是由于数学模型忽略了汽车悬架和轮胎滚动阻力, 数学模型的轮胎转动角速度与 Carsim 车辆模型的轮胎转动角速度存在一定的误差。此外, 左前轮和左后轮的侧向力的 UKF 估计值与 Carsim 实际值存在一定的误差, 其原因是由于数学模型忽略汽车悬架的影响, 在计算车辆侧向载荷转移时与实际的载荷转移存在一定的误差, 且数学模型中前轮的左右轮胎侧偏角假设相同, 故在轮胎垂向载荷和侧偏角的复合影响下导致左前轮和左后轮的侧向力的估计值与实际值出现了误差。

由图 9d 可知, UKF 观测器能够辨识出车辆质量、横摆转动惯量、质心位置及高度等车辆参数, 虽然其存在一定的误差, 但是误差相对较小。

综上所述, 该观测器在鱼钩角输入、滑行和加速不同工况下均能够在估计车辆速度和轮胎力等状态参数的同时, 还能够辨识出车辆的质量、转动惯量和质心位置。

3.2 观测器结果误差分析

由第 3.1 节可知, 本文设计的观测器能够有效的估计出车辆的纵向速度、侧向速度、轮胎侧向力及辨识出车辆的质量、横摆转动惯量、质心位置及高度等固有参数。为了验证该观测器的估计值和辨识结果的误差, 本节重点对上述的分析结果进行处理, 采用归一化误差百分比 E 定义评价观测器性能, 如式(19)所示, 两种工况的误差分析结果分别如图 10 和图 11 所示。

$$E = \frac{|x - x_{ref}|}{\max(|x_{ref}|)} \times 100\% \quad (19)$$

图 10 仿真结果误差分析

由图 10a 可知, UKF 观测器估计的车辆纵向速度和侧向速度的误差分别为 0.000 1%和 10.5%, 说明该观测器可以较好估计出车辆纵向速度和侧向速度, 且误差相对较小; 由图 10b 可知, UKF 观测器估计的左前轮侧向力、右前轮侧向力、左后轮侧向力和右后轮侧向力的误差分别为 15%、18%、21%和 14.5%, 产生该误差的原因如下: 由于数学模型忽略了悬架特性和轮胎滚动阻力, 进而导致轮胎侧偏角和簧上质量的侧向载荷转移与 Carsim 中的轮胎侧偏角和轮胎垂向载荷有一定的误差; 由图 10c 可知, 车辆质量、横摆转动惯量、质心至前轴的距离和质心高度的误差分别为 0.9%、0.001%、0.74%和 6.4%, 相对误差较小。

图 11 仿真结果误差分析

由图 11a 可知, UKF 观测器估计的车辆纵向速度和侧向速度的误差分别为 0.000 15% 和 13.5%, 说明该观测器可以较好估计出车辆纵向速度和侧向速度, 且误差相对较小; 由图 11b 可知, UKF 观测器估计的左前轮侧向力、右前轮侧向力、左后轮侧向力和右后轮侧向力的误差分别为 13.4%、15.3%、21.4% 和 15.1%, 产生该误差的原因是由于数学模型忽略了悬架特性和轮胎滚动阻力, 进而导致轮胎侧偏角和簧上质量的侧向载荷转移与 Carsim 中的轮胎侧偏角和轮胎垂向载荷有一定的误差; 由图 11c 可知, 车辆质量、横摆转动惯量、质心至前轴的距离和质心高度的误差分别为 0.1%、0.003%、0.856% 和 6.2%, 相对误差较小。

不同工况下的车辆状态及参数估计值与 Carsim 实际值的误差如表 2 所示。

表 2 不同工况下仿真结果误差

参数名称	滑行工况下	加速工况下
	误差百分比(%)	误差百分比(%)
纵向速度	0.000 1	0.000 15
侧向速度	10.5	13.5
左前轮侧向力	15	13.4
右前轮侧向力	18	15.3
左后轮侧向力	21	21.4
右后轮侧向力	14.5	15.1
整车质量	0.9	0.1
横摆转动惯量	0.001	0.003
质心至前轴距离	0.74	0.856
质心高度	6.4	6.2

综上所述, 该观测器能够较好地估计出车辆纵向速度、侧向速度、轮胎侧向力等状态及车辆质量、横摆转动惯量、质心至前轴的距离、质心高度等参数。

4 结论

考虑车辆质量直接影响横摆转动惯量、质心位置及高度、侧向载荷转移, 进而影响速度、加速度和轮胎侧向力等状态参数, 并且车辆速度、轮胎侧向力等状态及车辆质量、横摆转动惯量、质心位置 and 高度等车辆参数直接影响到分布式电驱动汽车的控制性能, 通过对状态向量的扩维, 将车辆的质量、横摆转动惯量、质心位置 and 高度扩维至状态向量中, 对车辆状态及参数进行了联合估计。

(1) 结合 UKF 算法的优点, 设计了车辆状态及参数的联合观测器。

(2) 在 Simulink/Carsim 环境下进行了联合仿真分析, 通过滑行和加速不同工况下的仿真结果对比分析, 该观测器能够有效地估计车辆的纵向速度、侧向速度、轮胎侧向力等车辆状态和车辆的质量、横摆转动惯量、质心位置 and 高度等车辆参数。

(3) 通过不同工况下的误差分析可知, 该观测器对车辆纵向速度、侧向速度、车辆质量、横摆转动惯量、质心位置及高度的估计误差最大值分别为 0.000 15%、13.5%、0.9%、0.1%、0.74% 和 6.4%, 相对误差较小。此外, 该观测器对轮胎侧向力的估计误差介于 13.4%~21.4%, 且误差主要是由 Carsim 车辆模型的悬架特性引起。

参 考 文 献

- [1] HUI Z, WANG J. Adaptive sliding-mode observer design for a selective catalytic reduction system of ground-vehicle diesel engines[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(4): 2027-2038.
- [2] 王震坡, 薛雪, 王亚超. 基于自适应无迹卡尔曼滤波的分布式驱动电动汽车车辆状态参数估计[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(7): 42-46.
WANG Zhenpo, XUE Xue, WANG Yachao. State parameter estimation of distributed drive electric vehicle based on adaptive unscented kalman filter[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(7): 42-46.
- [3] JUNG H, CHOI S B. Real-time individual tire force estimation for an all-wheel drive vehicle[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(4): 2934-2944.
- [4] SONG Y, SHU H, CHEN X, et al. Direct-yaw-moment control of four-wheel-drive electrical vehicle based on lateral tyre-road forces and sideslip angle observer[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2019, 13(2): 303-312.
- [5] CHEN T, XU X, CHEN L, et al. Estimation of longitudinal force, lateral vehicle speed and yaw rate for four-wheel independent driven electric vehicles[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 101: 377-388.
- [6] BOADA B L, GARCIA-POZUELO D, BOADA M J L, et al. A constrained dual Kalman filter based on pdf truncation for estimation of vehicle parameters and road bank angle: Analysis and experimental validation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(4): 1006-1016.
- [7] WIELITZKA M, DAGEN M, ORTMAIER T. Joint unscented Kalman filter for state and parameter estimation in vehicle dynamics[C/CD]// 2015 IEEE Conference on Control Applications (CCA). IEEE, 2015.
- [8] KANGHYUN N. Application of novel lateral tire force sensors to vehicle parameter estimation of electric vehicles[J]. Sensors, 2015, 15(11): 28385-28401.
- [9] JIANG K, VICTORINO A C, CHARARA A. Adaptive estimation of vehicle dynamics through RLS and Kalman filter approaches[C/CD]// 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems - (ITSC 2015). IEEE, 2015.
- [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] 白艳, 管欣. 车辆横摆转动惯量及轮胎侧偏刚度识别方法的研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(9): 125-128.
BAI Yan, GUAN Xin. Research on system identification of vehicle moment of inertia about the Z axis and tire cornering stiffness[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(9): 125-128.
- [12] LIN F, WANG H, WANG W, et al. Vehicle state and parameter estimation based on dual unscented particle filter algorithm[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 31(5): 568-575.
- [13] 解少博, 林程. 基于无迹卡尔曼滤波的车辆状态与参数估计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(12): 6-12.
XIE Shaobo, LIN Cheng. State and parameters estimation of vehicle based on UKF[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 6-12.
- [14] PACEJKA H B. Tyre and vehicle dynamics[M]. Helmond: Elsevier, 2006.
- [15] SIMON D. Optimal state estimation: Kalman, H_∞ , and nonlinear approaches[M]. New Jersey: Wiley-Interscience, 2006.
- [16] NIJMEIJER H. Observability of autonomous discrete time non-linear systems: A geometric approach[J]. International Journal of Control, 1982, 36(5): 867-874.
- [17] DOUMIATI M, VICTORINO A, CHARARA A, et al. A method to estimate the lateral tire force and the sideslip angle of a vehicle: Experimental validation[C]//Proceedings of the 2010 American Control Conference. IEEE, 2010: 6936-6942.

作者简介: 宋义彤, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为车辆系统动力学及底盘集成控制。

E-mail: yitongsong@163.com

舒红宇(通信作者), 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为新能源汽车及电动轮设计与控制, 车辆系统动力学与控制, 汽车传动核心基础部件。

E-mail: shyqu616@163.com