DOI: 10.3901/JME.2020.18.123

考虑复杂激励条件的分布式驱动电动汽车路面附着系数自适应估计方法*

熊璐^{1,2} 金达^{1,2} 冷搏^{1,2} 余卓平^{1,2} 杨兴^{1,2}

(1. 同济大学汽车学院 上海 201804;
2. 同济大学新能源汽车工程中心 上海 201804)

摘要: 路面峰值附着系数是实现车辆高品质运动控制的关键参数, 参数估计的精度与实时性会极大地影响控制的效果, 而多数动力学估计算法受限于车辆的激励条件, 难以达到满意的估计效果。设计一种模糊自适应路面附着系数融合估计方法, 充分利用车辆纵侧向激励, 以实现算法对车辆不同行驶工况的估计适应能力。分别设计不同激励条件下的路面附着系数估计方法, 通过车辆状态参数判断满足的激励条件, 模糊推理出当前纵侧向轮胎力所能达到的极限, 并据此设计融合观测器进行估计结果融合。多工况仿真和实车试验的结果表明, 融合观测器在高低附路面下和不同轮胎力激励时能快速估计出路面的峰值附着系数, 估计精度较高, 同时对轮胎力纵侧耦合的工况具有一定的鲁棒自适应性。

关键词: 分布式驱动电动汽车; 路面估计; 模糊自适应; 信息融合

中图分类号: U461

Adaptive Tire-road Friction Estimation Method for Distributed Drive Electric Vehicles Considering Multiple Road Excitations

XIONG Lu^{1,2} JIN Da^{1,2} LENG Bo^{1,2} YU Zhuoping^{1,2} YANG Xing^{1,2}

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804;
2. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804)

Abstract: The road friction coefficient is a key parameter for high-quality vehicle motion control. The accuracy and real-time of the parameter estimation results greatly affect the quality of control and most of the dynamic estimation methods are limited by the vehicle's excitation conditions and it is difficult to achieve satisfactory results. So, a fuzzy adaptive road friction coefficient fusion estimation method is designed to make full use of the vehicle's longitudinal and lateral excitations to achieve the algorithm's ability to adapt to different driving conditions of the vehicle. The road friction coefficient estimation methods under different excitation conditions are designed respectively. The vehicle condition parameters are used to determine the excitation conditions and the limit of the current longitudinal and lateral tire force can be inferred by fuzzy logic, and a fusion observer is designed to estimate the results. The results of simulation and real test show that the fusion method can quickly estimate the road friction coefficient under high μ and low μ roads and different tire force excitations and the estimation accuracy is high. The method has robust self-adaptability to the working conditions of tire force longitudinal and lateral coupling.

Key words: distributed drive electric vehicle; road estimation; fuzzy adaptive; information fusion

0 前言

随着主动安全控制系统在分布式驱动电动汽车上的广泛应用^[1-2], 路面附着系数作为控制过程中

的重要参数, 其估计的精确度会极大地影响控制的效果。总体来讲, 目前路面附着系统辨识的方法主要分为两类^[3]: 一类是通过传感器获得轮胎变形、噪声特征或路面的纹理特征并与附着系数之间建立映射关系。POHL等^[4]利用胎面元件的变形, 通过评估与路面接触的轮胎表面的机械应变来测量摩擦因数。HOLZMANN等^[5]提出利用麦克风采集噪声频率, 根据特征与路面进行匹配。余卓平等^[6]基于

* 国家重点研发计划(2018YFB0104805)和国家自然科学基金(51975414, U1564207)资助项目。20191205 收到初稿, 20200527 收到修改稿

不同路面材质的激光雷达反射强度差异,设计了一种路面附着系数概率估计模型。NOLTE 等^[7]通过搜集 6 种路面的图片,然后以 InceptionV3 和 ResNet50 深度神经网络分别进行训练,实现路面分类辨识。武洪强^[8]采用灰度共生矩阵提取路面纹理特征,并通过支持向量机实现了对 5 种路面进行了分类辨识。此类方法的优点在于辨识的探测范围广,有预测的作用;但是使用的传感器价格昂贵,且易受环境影响。另一类路面附着系统辨识方法是基于车辆动力学响应,通过搭建状态观测器的方式进行对路面输入的辨识。文献[9-11]利用最小二乘法根据轮胎滑动率与附着系数在小滑动率区间的线性关系估算路面附着系数。文献[12-14]通过 Burckhardt 模型、Dugoff 模型等轮胎模型建立轮胎纵向力与滑动率的关系,实现轮胎纵向滑动工况下路面附着系数的辨识。文献[15-17]通过刷子模型、TMsimple 模型等轮胎模型建立轮胎侧向力/回正力矩与侧偏角的关系,实现大小侧向工况下路面附着系数的辨识。此类方法的优点在于辨识实现条件容易,不需要增加额外的视觉传感器,且在轮胎模型准确的前提下辨识精度高;但是为了获取准确的辨识结果,需要足够的激励条件,即辨识效果只有在车辆的利用附着系数接近峰值附着系数时才比较明显,这样容易使车辆发生失稳。总体来看,传感器直接测量的方法只着眼于路面本身,并不涉及轮胎与路面的相互作用关系,动力学方法能充分考虑轮胎-路面的作用关系,是现阶段路面估计可靠而有效的方法。

近年来,有学者针对多种工况设计路面估计算法。AHN 等^[18]提出了 4 种不同激励条件下估算路面附着系数的方法,并依据激励的强度以模型切换的方式实现 4 种估计结果的融合。李亮等^[19]根据车辆转向时侧偏与横摆响应的非线性状态与路面附着利用率的关系设计附着估算偏差的补偿算法,实车试验表明算法具有较好的实时性和鲁棒性,并使得汽车电子稳定控制系统的控制性能有所提升。赵丰^[20]基于悬架系统的垂向时域响应及统计特征来估计路面不平度,基于路面不平度和路面附着系数之间的统计数据实现两者间的映射关系。

多工况估计的效果很大程度上取决于模型切换的平滑度以及单一估计方法在不同激励条件的鲁棒性。本文在基于车辆动力学响应设计路面附着系数估计方法的基础上,考虑使用模糊自适应的方法实现车辆激励状态的辨识,从而融合不同估计器的估计值。后续章节安排如下:第 1 节描述车辆受到路面对于轮胎不同方向力的激励时,相应的动力学方程

建立以及辨识路面峰值附着系数的估计算法设计。第 2 节考虑多种行驶工况下,基于自适应模糊推理系统设计路面峰值附着系数的融合估计算法。第 3 节和第 4 节分别通过仿真试验与实车试验来验证算法的有效性。第 5 节给出了本文研究工作的结论。

1 路面附着系数估计算法设计

1.1 纵向力激励下路面估计算法设计

建立整车的单轮运动模型如图 1 所示。

图 1 单轮动力学模型

图 1 中

$$F_x = \mu_x \cdot F_z \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{I_\omega} (T_m - F_x \cdot R) \quad (2)$$

$$\lambda = \begin{cases} \frac{\omega \cdot R - v_0}{\omega \cdot R} & v_0 < \omega \cdot R \\ \frac{v_0 - \omega \cdot R}{v_0} & v_0 \geq \omega \cdot R \end{cases} \quad (3)$$

式中, ω 表示车轮角速度, R 表示车轮滚动半径, T_m 表示作用在车轮上的驱/制动力矩, μ_x 表示当前轮胎对地面的利用附着系数, F_z 表示车轮受到的垂向载荷, I_ω 表示车轮的转动惯量, λ 表示车轮滑动率, v_0 表示车轮中心处的纵向速度, F_x 表示路面作用在轮胎接地区域的纵向力。

基于扰动观测理论^[13],设计轮胎纵向力观测器和路面附着系数估计算法如式(4)~(6)所示

$$\hat{F}_x = \frac{I_\omega}{R} (\dot{y} + K\omega) - F_z \cdot \mu_x(\hat{\theta}_x, \lambda) \quad (4)$$

$$\dot{y} = -\frac{K}{I_\omega} (T_m + R\hat{F}_x) + \frac{R}{I_\omega} \cdot \frac{\partial \mu_x(\hat{\theta}_x, \lambda)}{\partial \theta_x} \cdot \dot{\hat{\theta}}_x \quad (5)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_x = \gamma [\theta_x(\lambda, \hat{F}_x) - \hat{\theta}_x] \quad (6)$$

式中, $\hat{F}_x$ 表示轮胎纵向力的估计, $\mu_x(\hat{\theta}_x, \lambda)$ 表示基于路面附着系数估计值和滑动率计算的利用附着系数, K 表示纵向力估计器增益, $\theta_x(\lambda, \hat{F}_x)$ 表示

根据当前的纵向力和滑动率通过数值计算的方法在轮胎模型描述的曲线上计算得到的路面峰值附着系数, $\hat{\theta}_x$ 为纵向激励下路面峰值附着系数的估计值, γ 表示路面附着系数估计器增益, y 为计算过程中的中间变量。

1.2 侧向力激励下路面估计算法设计

为描述车辆的侧向运动, 建立 2 自由度车辆运动模型, 如图 2 所示。

图2 整车 2 自由度运动学模型

忽略车辆俯仰、侧倾运动自由度, 整车的前后车轮的侧偏角可以表示为

$$\alpha_f = \beta + \frac{l_f r}{v_x} - \delta \quad (7)$$

$$\alpha_r = \beta - \frac{l_r r}{v_x} \quad (8)$$

式中, δ 表示前轮转角, l_f 和 l_r 分别表示前后车轮中心到质心的距离, v_x 表示车辆质心处的纵向车速, β 表示车辆的质心侧偏角, α_f 和 α_r 分别表示前后车轮的侧偏角, r 表示车身的横摆角速度

当采用侧向力估计进行路面辨识时, 需要车辆达到较大的侧向加速度, 而相比之下, 回正力矩在轮胎小侧偏的情况下变化就已经比较明显, 对侧向加速度需求激励较小, 更加适合用作轮胎-路面的侧向力学特性估计。

基于车轮回正力矩估计^[15], 设计路面附着系数估计算法

$$M_k = A\dot{\delta}_w + B\ddot{\delta}_w + i_s M_s + i_m M_m \quad (9)$$

$$\hat{M}_k = f(\alpha, F_z) \quad (10)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_y = k_1 \text{sgn}(\hat{M}_k) \cdot (M_k - \hat{M}_k) + k_2 \text{sgn}(\hat{a}_y) \cdot (a_y - \hat{a}_y) \quad (11)$$

式中, α 表示车轮侧偏角, δ_w 表示方向盘转角, i_s 表示助力电机到主销处的力矩转动比, 是一个随转角的函数; i_m 表示转向盘到主销处的力矩转动比, 也是一个关于转向盘转角的函数; M_m 表示施加在转向盘的力矩; M_s 表示助力电机力矩, A 和 B 表示拟合参数; M_k 表示拟合的总的回正力矩; $\hat{M}_k$ 表示根据车轮垂向载荷和侧偏角计算得到的回正力矩估计值; $\hat{a}_y$ 表示车辆的侧向加速度估计值, a_y 表示车辆的侧向加速度实际值; k_1 和 k_2 表示估计器增益; $\hat{\theta}_y$ 表示侧向力激励下路面峰值附着系数估计值。

1.3 多工况融合路面估计算法设计

BAKKER 等^[21]提出一个经验公式去描述轮胎力纵侧耦合时的情况, 如式(12)~(20)所示, 通过设定一个等效滑动率 λ' 和 α' 来分配纵侧向力占的比重。然而, 式(15)与式(16)中的 $\sigma_{X\max}$ 和 $\sigma_{Y\max}$ 项通常难以获得。

$$\sigma_X = -\frac{\lambda}{1 + \lambda} \quad (12)$$

$$\sigma_Y = \frac{\tan \alpha}{1 + \lambda} \quad (13)$$

$$\sigma_t^* = \sqrt{\sigma_X^{*2} + \sigma_Y^{*2}} \quad (14)$$

$$\sigma_X^* = \frac{\sigma_X}{\sigma_{X\max}} \quad (15)$$

$$\sigma_Y^* = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{Y\max}} \quad (16)$$

$$\lambda' = \frac{\sigma_t^* \sigma_{X\max} \text{sign}(\sigma_X)}{1 + \sigma_t^* \sigma_{X\max} \text{sign}(\sigma_X)} \quad (17)$$

$$\alpha' = \arctan[\sigma_t^* \sigma_{Y\max} \text{sign}(\sigma_Y)] \quad (18)$$

$$F_{X0} = F_x(F_z, \lambda') \quad (19)$$

$$F_{Y0} = F_y(F_z, \alpha') \quad (20)$$

式中, $\sigma_{X\max}$ 和 $\sigma_{Y\max}$ 表示轮胎的利用附着系数在路面峰值附着系数时的滑动率和侧偏角, λ' 和 α' 为相当于受到单一激励作用时的车轮滑动率和车轮侧偏角。

考虑到“摩擦椭圆”效应, 当轮胎处于纵侧耦合工况时, 纵侧向能利用的最大的路面附着系数均会有所下降, 因此可以用式(21)描述当前纵侧向轮胎力所能达到的极限与总的路面峰值附着系数的关系

$$\begin{cases} \theta_x = C_1 \cdot \theta \\ \theta_y = C_2 \cdot \theta \\ \theta = C_2 \cdot \theta_x + C_1 \cdot \theta_y \\ \text{s.t. } C_1^2 + C_2^2 = 1, 0 \leq C_1, C_2 \leq 1 \end{cases} \quad (21)$$

式中, θ_x 为纵向利用附着系数极限, θ_y 为侧向利用附着系数极限, θ 为总的利用附着系数极限, C_1 和 C_2 的值与车辆状态有关。

因此可以构造融合路面观测器如式(22)所示, 并且对原观测器中的式(6)和式(11)修正如式(23)和式(24)所示

$$\dot{\hat{\theta}} = \hat{C}_2 \cdot \dot{\hat{\theta}}_x + \hat{C}_1 \cdot \dot{\hat{\theta}}_y \quad (22)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_x = \gamma[\theta_x(\lambda, \hat{F}_x) - \hat{C}_1 \cdot \hat{\theta}] \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\theta}}_y = & k_1 \operatorname{sgn}(\hat{M}_k) \cdot (M_k - \hat{C}_2 \hat{M}_k) + \\ & k_2 \operatorname{sgn}(\hat{a}_y) \cdot (a_y - \hat{C}_2 \hat{a}_y) \end{aligned} \quad (24)$$

式中, $\hat{C}_1$ 、 $\hat{C}_2$ 为 C_1 和 C_2 的估计值。

相比于车辆响应和估计器计算频率, 路面变化缓慢, 可以假设 $\dot{\theta} = 0$, 对观测器进行误差分析得到

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\theta}} = \dot{\theta} - \dot{\hat{\theta}} = & -\hat{C}_2 \gamma[\theta_x(\lambda, \hat{F}_x) - \hat{C}_1 \cdot \hat{\theta}] - \\ & \hat{C}_1 k_1 \operatorname{sgn}(\hat{M}_k) \cdot (M_k - \hat{C}_2 \hat{M}_k) - \\ & \hat{C}_1 k_2 \operatorname{sgn}(\hat{a}_y) \cdot (a_y - \hat{C}_2 \hat{a}_y) = \\ & -\hat{C}_2 \gamma[\theta_x(\lambda, \hat{F}_x) - C_1 \cdot \theta] - \\ & \hat{C}_1 k_1 \operatorname{sgn}(M_k) \cdot [M_k - C_2 M_k(\alpha, F_z)] - \\ & \hat{C}_1 k_2 \operatorname{sgn}(a_y) \cdot [a_y - C_2 a_y(\alpha, F_z)] + \\ & \hat{C}_2 \gamma \left(\hat{C}_1 - C_1 \frac{\theta}{\hat{\theta}} \right) \hat{\theta} + \\ & \hat{C}_1 k_1 \operatorname{sgn}(M_k) \cdot \left[\hat{C}_2 - C_2 \frac{M_k(\alpha, F_z)}{\hat{M}_k} \right] \hat{M}_k + \\ & \hat{C}_1 k_2 \operatorname{sgn}(a_y) \cdot \left[\hat{C}_2 - \frac{a_y(\alpha, F_z)}{\hat{a}_y} \right] \hat{a}_y \end{aligned} \quad (25)$$

$$\text{令 } \dot{\hat{\theta}} = \dot{s}_1 + \dot{s}_2$$

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 = & -\hat{C}_2 \gamma[\theta_x(\lambda, \hat{F}_x) - C_1 \cdot \theta] - \\ & \hat{C}_1 k_1 \operatorname{sgn}(M_k) \cdot [M_k - C_2 M_k(\alpha, F_z)] - \\ & \hat{C}_1 k_2 \operatorname{sgn}(a_y) \cdot [a_y - C_2 a_y(\alpha, F_z)] \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \dot{s}_2 = & \hat{C}_2 \cdot \left\{ \gamma \left(\hat{C}_1 - C_1 \frac{\theta}{\hat{\theta}} \right) \hat{\theta} + \right. \\ & \frac{\hat{C}_1}{\hat{C}_2} \cdot k_2 \operatorname{sgn}(a_y) \cdot \left[\hat{C}_2 - \frac{a_y(\alpha, F_z)}{\hat{a}_y} \right] \hat{a}_y + \\ & \left. \frac{\hat{C}_1}{\hat{C}_2} \cdot k_1 \operatorname{sgn}(M_k) \cdot \left[\hat{C}_2 - C_2 \frac{M_k(\alpha, F_z)}{\hat{M}_k} \right] \hat{M}_k \right\} \end{aligned} \quad (27)$$

根据文献[13]、[15]易知 s_1 项是收敛的, 对于 s_2 , 当 $\hat{C}_1 = C_1$, $\hat{C}_2 = C_2$ 且 $\theta = \hat{\theta}$ 时, s_2 的符号由增益 γ 、 k_1 和 k_2 决定。当 $\dot{s}_2 \geq 0$ 时, 若此时 $\theta > \hat{\theta}$, $\hat{\theta}$ 会减小, 此时考虑到 $\hat{M}_k$ 和 $\hat{a}_y$ 都会减小, 此时 $\dot{s}_2$ 减小直至趋向于 0, 因此估计器收敛但是存在估计偏小的稳态估计误差 s_2 ; 同理, 当 $\theta < \hat{\theta}$ 时, 估计器也收敛但是存在估计偏大的稳态估计误差 s_2 。

单一观测器的估计误差总和可以表示为

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\theta}} = \dot{\theta} - \dot{\hat{\theta}}_x + \dot{\hat{\theta}} - \dot{\hat{\theta}}_y = \\ -\gamma[\theta_x(\lambda, \hat{F}_x) - \hat{\theta}] - k_1 \operatorname{sgn}(M_k) \cdot (M_k - \hat{M}_k) - \\ k_2 \operatorname{sgn}(a_y) \cdot (a_y - \hat{a}_y) = s_1 + \gamma \left(1 - C_1 \frac{\theta}{\hat{\theta}} \right) \hat{\theta} + \\ k_1 \operatorname{sgn}(M_k) \cdot \left[1 - C_2 \frac{M_k(\alpha, F_z)}{\hat{M}_k} \right] \hat{M}_k + \\ k_2 \operatorname{sgn}(a_y) \cdot \left[1 - \frac{a_y(\alpha, F_z)}{\hat{a}_y} \right] \hat{a}_y \end{aligned} \quad (28)$$

考虑到 $\hat{C}_1$ 、 $\hat{C}_2 \in [0, 1]$, 因此融合观测器的误差在轮胎力纵侧耦合的情况下是要低于单一估计器。误差的大小程度与 C_1 和 C_2 的估计误差有关, 而下文通过模糊推理的手段, 来合理分配 $\hat{C}_1$ 、 $\hat{C}_2$ 。

2 模糊逻辑设计

2.1 模糊原则

设计基于模糊方法的估计融合策略, 通过车辆状态参数模糊推理出当前车辆的运动状态, 而后根据运动状态融合纵侧向激励下路面附着系数估计算法结果。

如图 3 所示, 主要考虑以下 4 种情况。

(1) 当车辆处于较为平稳的行驶工况时, 此时车轮滑动较小, 侧偏现象不明显, 纵侧向激励都很小, 路面附着系数利用率低、车辆稳定性裕度高, 应保持上一次的估计结果, 同时估计器停止估计。

(2) 当车轮出现明显的滑动而车辆的侧偏现象不明显时, 应认为此时代表纵向附着系数极限的 $\hat{C}_1$ 较大, 而代表侧向附着系数极限的 $\hat{C}_2$ 较小。

(3) 当车轮出现明显的侧偏现象而车辆的滑动现象不明显时, 应认为此时代表纵向附着系数极限的 $\hat{C}_1$ 较小, 而代表侧向附着系数极限的 $\hat{C}_2$ 较大。

(4) 当车轮出现明显的侧偏现象的同时, 车辆的滑动现象也比较明显时, 应认为此时代表纵向附着系数极限的 $\hat{C}_1$ 和代表侧向附着系数极限的 $\hat{C}_2$ 处于中等水平。

2.2 模糊逻辑设计

算法框架如图 4 所示。输入隶属度函数以滑动

图3 模糊规则逻辑框图

率参考 λ/C_λ 和侧偏角参考 α/C_α 作为输入量，其中 C_λ 和 C_α 为轮胎特性进入非线性区的突变点，可以认为是达到峰值附着系数对应的滑动率和侧偏角，这两项依据 $\hat{\theta}$ 通过数值计算实时得出；对不同估计器的 $\hat{C}_1$ 、 $\hat{C}_2$ 作为输出量，并依据融合估计器估计总的路面附着系数 $\hat{\theta}$ 。

图4 融合模糊逻辑的多工况融合路面估计算法框架

设置输入量和输出量的论域均为[0,1]，并对论域按照 S、M、B(对应小、中、大)进行模糊隶属度

划分相应的区间。其中，建立的模糊推理规则表如表1所示。图5则反映了在表1建立的模糊推理规则下，估计器参数 $\hat{C}_1$ 、 $\hat{C}_2$ 与滑动率参考 λ/C_λ 、侧偏角参考 α/C_α 之间的映射关系。

表1 模糊推理规则表

侧偏角参考 α/C_α	滑动率参考 λ/C_λ		
	S	M	B
S	BB	MB	SB
M	BM	SM	SM
B	BS	MS	SS

(a) 估计器参数 $\hat{C}_1$ 与滑动率参考 λ/C_λ 和侧偏角参考 α/C_α 映射关系 (b) 估计器参数 $\hat{C}_2$ 与滑动率参考 λ/C_λ 和侧偏角参考 α/C_α 的映射关系

图5 模糊推理规则下输入量与输出量的映射关系

3 仿真验证

为验证提出的模糊自适应路面估计融合算法，进行 Carsim 和 Matlab/Simulink 联合仿真。仿真工况为连续的两段双移线，车辆先以 30 km/h 起步，然后直线加速至 50 km/h，之后匀速通过第一个双移线。在进行第二个双移线过程中，车辆速度均匀加速至 60 km/h。在 Carsim 输出信号设置中，将车辆的转向盘转角、横摆角速度、纵向加速度、横向加速度和轮速信号传输至 Matlab/Simulink 所建的模糊自适应路面估计融合算法，进行路面估计。

其中,第一个双移线工况的纵侧向激励依次单独进行,主要目的是融合估计算法在受到单一方向激励力时与单一估计方法的估计性能对比;第二个双移线工况的纵侧向激励同时进行,主要目的是融合估计算法在受到复杂激励力时与单一估计方法的估计性能对比。为了对比仿真的效果,也给出了只采用单一估计方法进行估计的结果。

参考文献[22],设置路面附着系数为0.6(模拟湿沥青路面)和0.2(模拟冰雪路面),仿真结果如图6、7所示。

由仿真结果可知,车辆在0~3 s和12~15 s受到明显的纵向激励,8~20 s之间收到连续变化的侧向激励。0~2 s时间内,在单一纵向激励下,融合估计器和纵向力激励估计器均有响应,而

图6 路面附着系数0.6的仿真结果

(b) 车身纵侧向加速度

(c) 侧偏角

(d) 滑动率

(e) 纵侧向附着系数极限模糊逻辑值

(f) 路面附着系数估计结果

图7 路面附着系数0.2的仿真结果

侧向力激励估计器无响应,激励约1 s,收敛至目标值附近。2 s以后,纵向激励不足,引起纵向力激励估计停止。8 s侧向力激励开始,纵向力估计器开始出现低估。在12~15 s纵侧向力激励同时存在时,由于此时侧向激励连续大幅度变化,而纵向激励也持续存在,轮胎模型失真,单一估计器估计产生显著的低估或者振荡,而融合估计器也受到一定的影响,当仍能维持在真实值附近小幅振荡。从最后的收敛结果来看,融合估计器的精度也能维持在 ± 0.05 以内,是三个估计器中精度最高的。融合估计算法则能充分利用车辆的激励信息,并且根据工况不同做出自适应,提高了算法的实时性和鲁棒性。

4 试验验证

如图8所示,试验平台每个车轮都装备轮毂电机,可以独立进行驱动。该试验车配备奇石乐光学传感器,能够较为准确地测量纵、侧向车速,可以完成试验结果的检验。传感器包括高更新频率的GPS、惯性元件、转向盘转角和转矩传感器。使用量产的电动汽车整车控制器进行数据采集及实现在线估计。其中,本文设计的模糊逻辑以查询表的方式烧录在控制器中。

图8 实车试验平台

参照《GB/T 13594—2003 机动车和挂车防抱制动性能和试验方法》对路面附着系数进行标定^[23]。试验在路面附着系数为 0.75 和 0.45 的干沥青和湿沥青道路上进行,工况选取为两组速度为 60 km/h 和 50 km/h 的双移线。考虑到场地限制,双移线路线的纵向距离被缩短,试验过程中轮胎受到来自路面纵侧向不同程度的激励力。试验结果如图 9、10 所示。

由图可见,2 s 之前,车辆各个方向的激励均不是很明显,此时估计器停止工作,估计结果保留原来的值,这一点三个估计器均没有差别。2 s 左

(a) 转向盘转角

(b) 车身纵向侧向加速度

(c) 侧偏角

(d) 滑动率

(e) 纵侧向附着系数极限模糊逻辑值

(f) 路面附着系数估计结果

图9 路面附着系数 0.75 的实车试验结果

(a) 转向盘转角

图 10 路面附着系数 0.45 的实车试验结果

右, 激励状态发生改变, 侧向力开始产生连续变化, 此后为了保持车速, 纵向力为小幅变化。2 s 之后的过程中, 虽然纵向力激励足够, 但是由于轮胎模型失真, 基于纵向力激励的观测器开始振荡, 虽然在 3 s 左右侧向力减小, 但是由于时间很短, 估计器没来得及收敛, 相比较之下, 融合估计器能充分利用激励信息, 实现快速收敛, 收敛时间在 1 s 左右。而且在 3~6 s 时, 侧向力出现连续大幅变化, 三个估计器都存在一定程度的估计波动的情况, 尤其高附路面的侧向力激励估计器表现较为显著, 而融合估计器能通过车辆当前的状态实时调整 $\hat{C}_1$ 、 $\hat{C}_2$, 所以其估计总体比较平稳(因为路面总的附着系数变化不大), 当然由于 $\hat{C}_1$ 、 $\hat{C}_2$ 存在的估计偏差, 使得估计结果有一定的稳态误差, 但是收敛后的稳态误差保持在 ± 0.1 左右, 高于单一激励力作用下的估计器。总体来讲, 融合估计器能充分适应复杂轮胎力激励下的路面估计, 估计过程更加平稳, 波动小, 而且精度高于单一估计器。

5 结论

(1) 通过车辆状态参数模糊推理出当前车辆的运动状态, 实现车辆在多工况行驶下轮胎纵向侧向激励状态的表征。

(2) 根据轮胎激励状态不同分别设计路面附着系数估计算法, 并依据模糊推理的车辆运动状态, 通过构造融合估计器实现算法对车辆不同行驶工况的适应能力。

(3) 仿真和实车试验验证了算法在高低附路面的估计均具有较好的精度和实时性, 同时对激励变化具有鲁棒自适应性。

参 考 文 献

- [1] YU Zhuoping, LENG Bo, XIONG Lu, et al. Direct yaw moment control for distributed drive electric vehicle handling performance improvement[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(3): 486-497.
- [2] 张利鹏, 李亮, 祁炳楠, 等. 双电机分布式驱动汽车高速稳定性机电耦合控制[J]. 机械工程学报, 2015, 51(16): 29-40.
ZHANG Lipeng, LI Liang, QI Bingnan, et al. Mechanical coupling control of high-speed stability of dual-motor distributed drive vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(16): 29-40.
- [3] 王震坡, 丁晓林, 张雷. 四轮轮毂电机驱动电动汽车驱动防滑控制关键技术综述[J]. 机械工程学报, 2019, 55(12): 99-120.
WANG Zhenpo, DING Xiaolin, ZHANG Lei. Summary of key technologies for driving anti-skid control of four-wheel hub motor driven by electric vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(12): 99-120.
- [4] POHL A, STEINDL R, REINDL L. The intelligent tire utilizing passive SAW sensors: Measurement of tire friction[J]. IEEE Trans. Instrum., 1999, 48(6): 1041-1046.
- [5] HOLZMANN F, BELLINO M, SIEGWART R, et al. Predictive estimation of the road-tire friction coefficient[J]. IEEE International Conference on Control Applications, 2006: 885-890.
- [6] 余卓平, 曾德全, 熊璐, 等. 基于激光雷达的无人车路面附着系数估计[J]. 华中科技大学学报, 2019, 47(7): 124-127.
YU Zhuoping, ZENG Dequan, XIONG Lu, et al. Road adhesion coefficient estimation for unmanned vehicle based on lidar[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2019, 47(7): 124-127.
- [7] NOLTE M, KISTER N, MAURER M. Assessment of deep convolutional neural networks for road surface classification[C]// 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2018, New Jersey, USA: IEEE Piscataway, 2018: 381-386.
- [8] 武洪强. 基于支持向量机的路面状态视频图像识别技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
WU Hongqiang. Research on pavement status video image recognition technology based on support vector machine[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [9] 龚节坤. 基于实时路面附着条件的跟驰模型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
GONG Jiekun. Research on car-following model based on real-time road surface attachment conditions[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [10] 杨秀建, 李金雨, 张昆, 等. 基于路面附着系数估计的车辆自适应巡航控制研究[J]. 南京理工大学学报, 2018, 42(4): 466-473.
YANG Xiujian, LI Jinyu, ZHANG Kun, et al. Research on vehicle adaptive cruise control based on road surface adhesion coefficient estimation[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2018, 42(4): 466-473.
- [11] LI K, MISENER J. On-board road condition monitoring system using slip-based tyre road friction estimation and wheel speed signal analysis[J]. Proc. IMech E, Part K: J. Multibody Dynamics, 2007, 221(1): 129-146.
- [12] 杨秀建, 李金雨, 张昆, 等. 基于路面附着系数估计的车辆自适应巡航控制研究[J]. 南京理工大学学报, 2018, 42(4): 466-473.
YANG Xiujian, LI Jinyu, ZHANG Kun, et al. Study on vehicle adaptive cruise control based on road surface adhesion coefficient estimation[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2018, 42(4): 466-473.
- [13] XIA Xin, XIONG Lu, SUN Kai, et al. Estimation of maximum road friction coefficient based on Lyapunov method[J]. International Journal of Automotive Technology, 2016, 17(6): 991-1002.
- [14] 林棻, 黄超. 采用 UKF 算法估计路面附着系数[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(7): 115-120.
LIN Fen, HUANG Chao. Using UKF algorithm to estimate road surface adhesion coefficient[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(7): 115-120.
- [15] LIN Xuefeng, XIONG Lu, XIA Xin. Sideslip angle and tire-road friction coefficient estimation simultaneously for autonomous vehicle[C]// 25th IAVSD International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, 2017, Rockhampton, Australia: CRC Press/Balkema, 2017: 425-430.
- [16] 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, 2017, 44(4): 16-22.
ZHOU Bing, TIAN Chen, SONG Yitong, et al. Study on afs control strategy based on estimation of road surface

- adhesion coefficient[J]. Journal of Hunan University, 2017, 44(4): 16-22.
- [17] SHAO Liang, JIN Chi, LEX C, et al. Robust road friction estimation during vehicle steering[J]. Vehicle System Dynamics, 2019, 57(4): 493-519.
- [18] AHN C, PENG H, TSENG H. Robust estimation of road friction coefficient using lateral and longitudinal vehicle dynamics[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(6): 961-985.
- [19] 李亮, 朱宏军, 陈杰, 等. 用于汽车稳定性控制的路面附着识别算法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 132-138.
- LI Liang, ZHU Hongjun, CHEN Jie, et al. Road friction identification algorithm for the vehicle stability control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(2): 132-138.
- [20] 赵丰. 基于路面感知的车辆智能悬架控制策略研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- ZHAO Feng. Research on vehicle intelligent suspension control strategy based on pavement sensing[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [21] BAKKER E, PACEJKA H, LIDNER L. A New tire model with an application in vehicle dynamics studies[C]// 4th Auto Technologies Conference, 1989, Monte Carlo, Monaco: SAE International, 1989: 83-95.
- [22] 喻凡, 林逸. 汽车系统动力学[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- YU Fan, LIN Yi. Automotive system dynamics[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [23] 全国汽车标准化技术委员会. GB/T 13594—2003 机动车和挂车防抱制动性能和试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- National Automobile Standardization Technical Committee. GB/T 13594—2003 Anti-lock braking performance and test methods for motor vehicles and trailers[S]. Beijing: China Standard Press, 2003.
-
- 作者简介: 熊璐, 男, 1978 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为汽车系统动力学与控制。
E-mail: xiong_lu@tongji.edu.cn
- 冷搏(通信作者), 男, 1991 年出生, 博士。主要研究方向为车辆运动控制、状态辨识与参数估计。
E-mail: harrisonleng@gmail.com