

Road Utilization Adhesion Coefficient Real-Time Estimation for ASR System

Jiuhong Ruan^{1,2}, Yibin Li², Fuguang Yang^{1,2}, Xuewen Rong², Rui Song²

¹⁾ Advanced Vehicle and Robot Institute, Shandong Jiaotong University, Jinan, Shandong, China

²⁾ School of Automation Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong, China

Abstract— The real-time estimation of road utilization adhesion coefficient is an important issue for the ASR (Anti-Slip Regulation) system of electric wheel independent drive vehicle. Firstly, the 1/4 vehicle dynamics model was built based on the LuGre tire model. Then combined with wheel angular velocity information, the exponential approach law-based sliding mode observer for the road utilization adhesion coefficient estimation was designed. And the observer's asymptotic stability was proved also. Finally, at different conditions of constant target slip rate, variable target slip rate and ASR controllers of different type, the simulations of road utilization adhesion coefficient real-time estimation were done in the vehicle ASR process. The results show the effectiveness and robustness of the observer proposed.

Keywords— sliding mode observer, utilization adhesion coefficient, ASR, LuGre tire model

车辆驱动防滑系统中路面利用附着系数的实时估计

阮久宏^{1,2}, 李贻斌², 杨福广^{1,2}, 荣学文², 宋锐²

¹⁾ 山东交通学院 先进车辆与机器人研究所, 济南, 山东, 中国

²⁾ 山东大学 控制科学与工程学院, 济南, 山东, 中国

摘 要 针对独立电驱动车辆驱动防滑系统中路面利用附着系数的实时估计问题进行研究。首先使用 LuGre 轮胎动态模型建立 1/4 车辆动力学模型, 然后结合车轮转速信息, 设计采用指数趋近率的路面利用附着系数滑模观测器, 证明观测器的渐进稳定性。最后使用恒定目标滑移率、动态目标滑移率和不同的控制器, 对突变路面条件下车辆驱动防滑过程中路面利用附着系数的实时估计进行仿真。仿真结果表明了所提估计方法的准确性和鲁棒性。

关键词 滑模观测器, 利用附着系数, 驱动防滑系统, LuGre 轮胎模型

1. 引言

独立电驱动车辆指的是各车轮均采用独立电动机进行独立驱动的车辆, 其特点是传动结构简洁, 具有驱动冗余, 动力配置方案多样, 可以为主动安全系统的灵活构建提供更大潜力。

众所周知, 车辆运动过程中的驱动力产生于轮胎与路面之间的摩擦接触面, 所能产生的摩擦力即附着力由路面

附着系数进行表征, 它的实时估计是车辆主动安全系统如 ABS、ASR、EBD、ESP、DYC 等进行决策的主要依据。当前使用的路面附着系数识别技术主要有两类^{[1][2]}: 一类是基于光、声、微波、图像等传感器的路面直接检测方法, 另一类是基于车辆动力学参数进行估计的方法。前者能够获得较好的判别效果, 但存在需要很多附加设备等的缺点, 不但使道路识别系统的结构变得复杂, 而且提高了系统成本, 难以实现大规模商业应用。基于车辆动力学参数估计的方法主要是根据纵向附着系数-滑移率曲线即 $\mu-s$ 曲线的形状估算路面最大附着系数^[1], 其基础是路面利用附着系数的实时估计。文献[2-3]利用车辆加、减速过程信息,

此项工作得到下述项目资助: 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(2008BS05003), 交通运输部科技计划(2008-319-817-070), 汽车安全与节能国家重点实验室开放基金(KF09061)

通过车轮动力学方程直接计算 μ ，这样做的好处是物理意义清晰，计算过程简单，但需要安装加速度传感器或者在安装速度传感器的基础上，通过微分环节获得加、减速度，会不可避免地引入噪声。为克服这一不足，文献[4]使用自适应卡尔曼滤波方法估算轮速信息、轮胎驱动力等信息，进而计算路面附着系数。文献[5]使用 LuGre 轮胎模型和通用线性观测器估计 LuGre 模型中路面参数 θ ，以此来确定附着系数。

本文基于车轮转速信息和 LuGre 轮胎动态模型，设计采用指数趋近率的滑模观测器 (Sliding Mode Observer) 实现车轮驱动过程中纵向利用附着系数 μ 的实时估计。论文组织如下：第 2 部分结合 LuGre 轮胎模型建立简化的 1/4 车辆模型；第 3 部分设计基于车轮角速度信息的路面利用附着系数滑模观测器，并证明其滑模到达条件；第 4 部分对车辆驱动过程进行仿真，检验附着系数估计的准确性、鲁棒性以及控制器和滑模观测器设计的可分离性。

2. 系统动力学模型

假设路面水平，忽略轮胎侧偏角、滚动阻力、风阻等影响，四个车轮所处路况相同，只考虑纵向特性，则单个车轮驱动过程中的动力学(1/4车辆)模型如图1所示。根据牛顿定律，该模型可由式(1)描述^[7]。式中， V 是车辆纵向速度， ω 为车轮角速度； m 为 1/4 车辆质量； R 为车轮转动半径； J 为折算到车轮的转动惯量； T_b 为驱动力矩， u 为控制器输出信号，将电动机考虑成比例环节，增益为 K ； F_x 为地面通过轮胎施加于车轮的纵向摩擦力， F_z 为车轮垂向载荷。

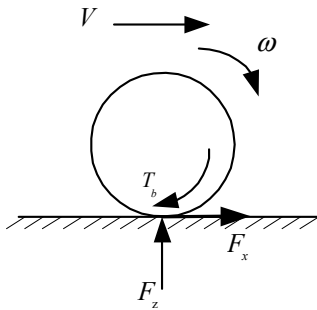


图 1 1/4 车辆模型

$$\begin{cases} m\dot{V} = F_x \\ J\dot{\omega} = -F_x R + T_b \\ T_b = Ku \\ F_x = F_z \mu \\ F_z = mg \end{cases} \quad (1)$$

本文使用文献[6]给出的纵向 LuGre 动态模型研究 μ 的实时估计问题。LuGre 模型稳态响应能够以极高的精度

逼近魔术公式，同时又能实时反映轮胎的动态过程，对于轮胎-路面动力学研究和车轮驱动控制器的设计来说是一个重要进展，其表达式如式(2)所示。

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = v_r - \frac{\theta \sigma_0 |v_r|}{g(v_r)} z(t) - k(t) |r\omega| z(t) \\ g(v_r) = \mu_c + (\mu_s - \mu_c) e^{-|v_r/v_s|^a} \\ F_x = (\sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 v_r) F_z \end{cases} \quad (2)$$

式中， z 为轮胎橡胶内部摩擦状态变量； θ 为路面状态表征参数，如干燥坚硬路面 $\theta=1.0$ ，冰滑路面 $\theta=10.0$ 等； σ_0 是轮胎橡胶纵向集总刚度， σ_1 是纵向集总阻尼， σ_2 是粘性相对阻尼； μ_c 是名义库仑摩擦系数， μ_s 是名义静态摩擦系数，($\mu_c \leq \mu_s$)； a 为某一常数，用于逼近轮胎稳态 $\mu-s$ 特性； v 是 Stribeck 相对速度； $k(t)$ 是反映轮胎-路面接触区域特性的变量，可以是常数，也可以是摩擦状态的函数； v_r 是车轮相对速度；其它参数意义同前。

依据文献[6]中的参数，得到不同路况下轮胎纵向滑移率 s 与纵向利用附着系数 μ 之间的关系如图 2。

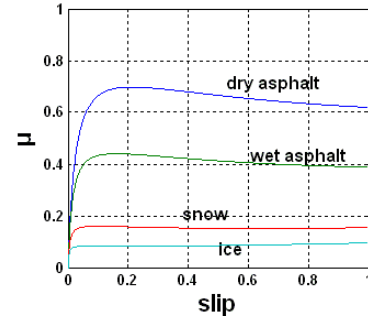


图 2 纵向 μ - s 曲线

3. 基于滑模观测器的附着系数估计

根据(1)式有：

$$\dot{\omega} = -\frac{F_x R}{J} + \frac{T_b}{J} = -\frac{mg\mu(s, \omega)R}{J} + \frac{K}{J}u \quad (3)$$

可见这是一个一阶非线性系统。令

$$\begin{cases} \omega = x_1 \\ \frac{K}{J} = b \\ \frac{F_x R}{J} = x_2 \end{cases} \quad (4)$$

将 ω 作为系统的输出，则式(4)可以写成

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -x_2 + bu \\ y = x_1 \end{cases} \quad (5)$$

ω 可以通过传感器直接测量，但不可避免地会存在噪声，因此本系统不直接使用 ω 的测量值作为系统的反馈量，而

是通过观测器获得。

式 (5) 对应的观测系统为：

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = -\hat{x}_2 + bu \\ \dot{\hat{y}} = \hat{x}_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中 \hat{x}_1 、 \hat{x}_2 和 \hat{y} 分别是 x_1 、 x_2 和 y 的估计值。为了满足滑模变结构控制的到达条件，同时尽量削弱到达时产生的抖动，本文采用改进的指数趋近率^{[7][8]}，如式(7)。

$$\dot{s} = \dot{\hat{x}}_1 - \dot{x}_1 = -ks - \varepsilon \operatorname{sgn}(s), \quad \varepsilon > 0, k > 0 \quad (7)$$

如果 ε 取值很小、 k 值相当大，则可保证趋近速度在远离滑模面时大，而在滑模面附近时渐近于很小的速度，这样系统运动穿过滑模面 $s = 0$ 时的距离就小，从而切换的滞后小，抖动也就小。这样可以构成滑模观测器如下：

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = -\hat{x}_2 + bu - k_1 s - \varepsilon_1 \operatorname{sgn}(s) \\ \dot{\hat{x}}_2 = -k_2 s - \varepsilon_2 \operatorname{sgn}(s) \end{cases} \quad (8)$$

下面证明 $\varepsilon > 0, k > 0$ 条件下观测器的稳定性。由于：

$$s\dot{s} = s(-\varepsilon |s| \operatorname{sgn}(s) - ks) = -\varepsilon s |s| - ks^2 = -\varepsilon s^2 - ks^2$$

又因为 $\varepsilon > 0, k > 0$ ，所以 $s\dot{s} < 0$ ，满足滑模到达条件，即 \hat{x}_1 、 \hat{x}_2 逼近 x_1 、 x_2 的过程具有渐进稳定性，可以在有限时间内使得：

$$\begin{cases} \hat{x}_1 \rightarrow x_1 = \omega \\ \hat{x}_2 \rightarrow x_2 = \frac{F_x R}{J} = \frac{mg\mu R}{J} \end{cases} \quad (9)$$

由此得到：

$$\begin{cases} \hat{\omega} = \hat{x}_1 \\ \hat{\mu} = \frac{\hat{x}_2 J}{mgR} \end{cases} \quad (10)$$

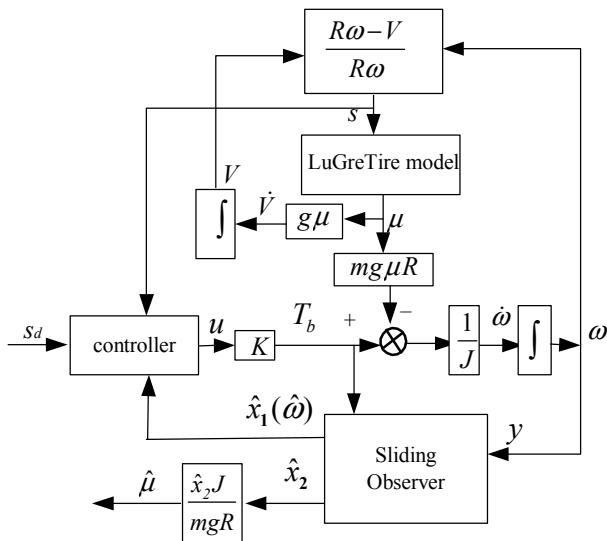


图 3 用于附着系数估计的滑模观测器结构图

图 3 中通过滑模观测器得到的 $\hat{\mu}$ 将用于最大路面附着系数的实时估计，并进一步提供给决策级处理器作为独立驱动力分配的约束条件。

4. 仿真研究

假设四个车轮所处的水平路面条件完全一致，忽略滚动阻力、风阻等影响，车辆初始速度 $\omega_0 = 12.5 \text{ rad/s}$ ，初始滑移率 $s_0 = 0$ ， $J = 0.2344 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ， $r = 0.2 \text{ m}$ ， $m = 50 \text{ kg}$ ， $K = 20$ 。仿真时使用如图 4 所示的路面附着系数突变的道路：开始的三段路面依次为干柏油、湿柏油、雪路面、冰路面，长度分别是 10m、10m、45m、15m，然后为干沥青路面。假设轮子最大驱动扭矩 120N.m。观测器参数为 $k_1 = 100$ ， $k_2 = 4000$ ， $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.1$ 。图 3 中的控制器使用自抗扰控制器^[9]（Active Disturbance Rejection Controller, ADRC）。仿真时间步长 0.001 秒。

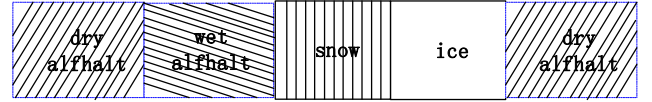


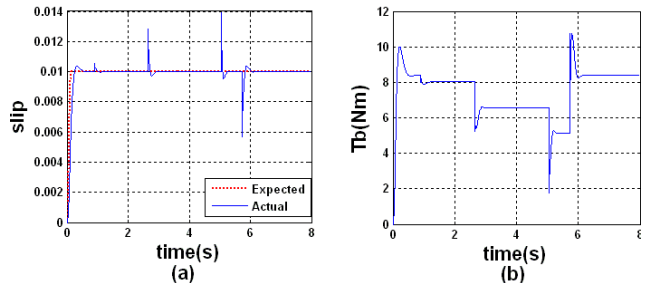
图 4 仿真过程使用的路面

4.1 恒定目标滑移率情况下的仿真

在图 4 给出的道路上对车辆进行加速。图 5 和图 6 分别是低滑移率 ($s_d = 0.01$) 和高滑移率 ($s_d = 0.15$) 加速过程的仿真结果。可见，在不同的目标滑移率下，估计的路面利用附着系数与实际的路面利用附着系数很好地吻合，估计的车轮角速度与实际的车轮角速度也很好地吻合，只有在路面切换时存在偏差，但这种估计偏差很快消失，表明了这种估计方式的准确性、快速性。图 5(a) 和图 6(a) 表明了采用估计速度作反馈的 ASR 系统经过突变路面时仍然具有很强的鲁棒性。

4.2 动态目标滑移率情况下的仿真

仿真初始条件和参数与前文相同。为了保证车辆按照规划的横摆率运动，需要实时调整车轮的驱动力矩，为此给定变化的目标滑移率如图 7(a)。由仿真结果可见该观测器在动态变化的目标滑移率以及突变的路面条件下，仅仅在路面突变点的路面利用附着系数估计值与实际值差别较大，其他情况下仍然可以进行准确估计。



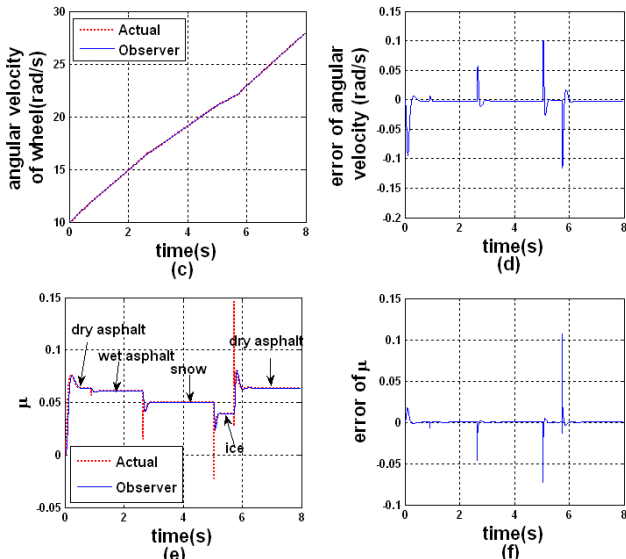


图 5 恒定目标滑移率较小时的仿真结果($S_d = 0.01$)

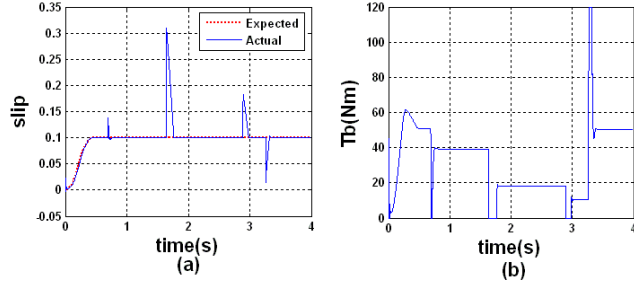


图 6 恒定目标滑移率较大时的仿真结果($S_d = 0.15$)

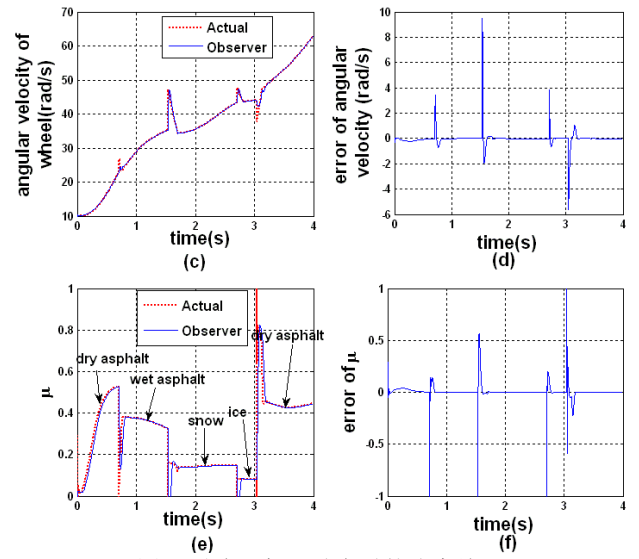
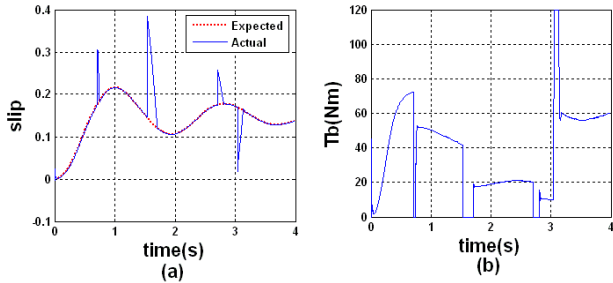


图 7 动态目标滑移率时的仿真结果

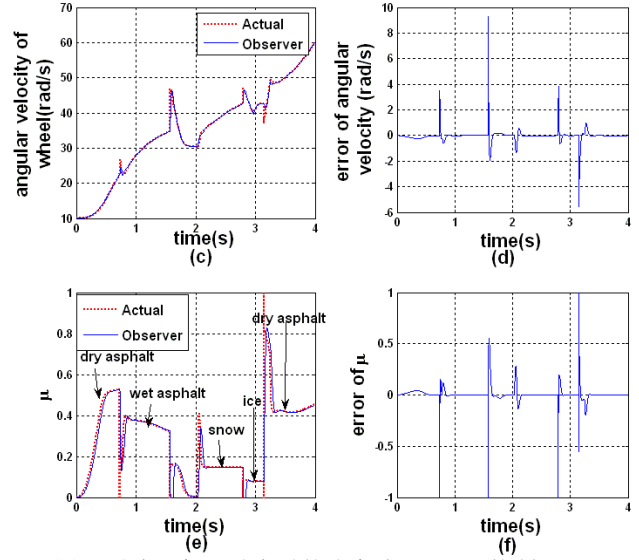
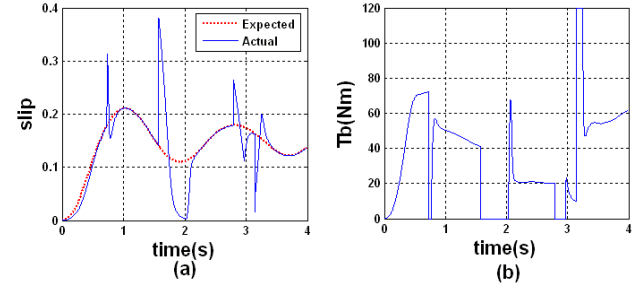


图 8 动态目标滑移率时的仿真结果 (PID 控制器)

4.3 使用PID控制器情况下的仿真

当图 3 中的控制器使用 PID 控制器时得到的仿真结果如图 8 (控制器参数不同, 其它参数同图 7)。比较图 8(a)和图 7(a)可见, PID 控制的效果比 ADRC 稍差, 但是估计的路面利用附着系数、车轮速度与实际值同样能够良好地吻合。可见, 所设计的观测器是不依赖于控制器的。

5. 结论以及进一步工作

为了给独立电驱动车辆ASR主动安全系统提供决策依据,本文在利用车轮转速传感器的基础上,提出利用滑模观测器实时估计路面利用附着系数的方法,避免了直接微分计算而引入噪声的不足。不同路面条件和期望滑移率下车辆加速过程的仿真结果表明了所提出方法的有效性、鲁棒性,以及观测器与控制器之间的独立性。同时,只要将图1中的 T_b 和 F_x 变换方向,就可以得到制动状态的1/4车辆模型,所以该观测器同样可以用于制动过程路面利用附着系数的估计。

进一步工作包括:

(1)在此方法的基础上进一步研究如何根据路面利用附着系数估计最大附着系数;

(2)将所提方法用于独立驱动/独立制动/独立转向的高速机动车辆/机器人平台的研究工作中,进一步检验该算法的实用性并对其进行完善。

参考文献

- [1] 余卓平, 左建令, 张立军. 路面附着系数估算技术发展现状综述[J]. 汽车工程, Vol.28, No.6, 546-549, 2006.
- [2] Yukihiisa Sasada. Development of the Road Surface Condition Sensing System. International Conference on Intelligent Transportation Systems[C], pp14-19, 1999.
- [3] 李君, 喻凡, 张建武. 基于道路自动识别 ABS 模糊控制系统的研究[J]. 农业机械学报, Vol.32, No.5, 26-29, 2001.
- [4] 周斯加, 罗玉涛, 邓志君, 黄向东. 基于自适应滤波的电动车纵向滑移率识别方法[J]. 交通与计算机, Vol.25, No.3, 70-74, 2007.
- [5] Canudas-de-Wit, C.; Horowitz, R. Observers for Tire/road Contact Friction using only wheel angular velocity information[C]. Proceedings of the 38 Conference on Decision & Control, 3932-3937. 1999
- [6] 阮久宏, 杨福广等. 基于 LuGre 动态模型的车轮独立驱动控制研究[J]. Chinese Control Conference 27th, 441-445, 2008.
- [7] 刘金琨. 滑模变结构控制 matlab 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [8] 毛艳娥, 井元伟, 张嗣瀛. 汽车 ABS 滑模变结构控制方法的研究[J]. 系统仿真学报, Vol.20, No.5, 2008.
- [9] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, Vol3, No4, 13-18, 2002.