

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.08.002

基于扩张状态观测器的路面附着系数实时估计*

杨福广^{1,2} 李贻斌¹ 阮久宏^{1,2} 荣学文¹ 宋锐¹

(1. 山东大学控制科学与工程学院, 济南 250061; 2. 山东交通学院先进车辆研究所, 济南 250023)

【摘要】 对车辆动力学控制中的道路路面附着系数实时估计问题进行研究。首先使用魔术公式建立1/4车辆制动模型,即车轮制动力学模型;然后将其中的附着系数相关项视为制动系统的扩张状态,建立其扩张状态观测器,通过轮速信号和制动力矩信号实时观测制动过程中地面与轮胎间的纵向力,进而计算出路面附着系数;最后在均匀路面和突变路面条件下进行仿真研究。结果表明,所提出的方法对车辆制动系统参数摄动和传感器噪声具有鲁棒性,可以准确地实现道路路面附着系数的实时估计,观测器与控制器设计具有一定独立性。

关键词: 路面附着系数 实时估计 扩张状态观测器

中图分类号: U461.1; TP29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)08-0006-04

Real-time Estimation of Tire Road Friction Coefficient Based on Extend State Observer

Yang Fuguang^{1,2} Li Yibin¹ Ruan Jiahong^{1,2} Rong Xuewen¹ Song Rui¹

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

2. Advanced Vehicle and Robot Institute, Shandong Jiaotong University, Ji'nan 250023, China)

Abstract

The road adhesion coefficient real-time estimation for vehicle dynamic control was investigated. Firstly, dynamic model of tire for braking was given based on magic formulation. Secondly, the related item to adhesion coefficient of the dynamic model was considered as one extended state of braking system, so extended state observer (ESO) was designed to estimate friction force between roads and tire in real-time based on the velocity of wheel and torque for braking. Adhesion coefficient was deduced. Finally, simulations were performed on uniformity road and varied road. The simulation results showed this method was robust to parameters perturbation of braking system and sensor noise, it could estimate adhesion coefficient exactly in real-time. Observer was separated from controller design.

Key words Adhesion coefficient, Real-time estimate, Extended state observer

引言

车辆运动过程中的驱动力、制动力、横向力等,都产生于轮胎与路面之间的接触面上,因此,在该接触面上是否能够产生足够大的摩擦力,将极大的影响汽车行驶安全性。为此需要对路况进行实时识别,为车辆主动安全装置(ABS、ASR、EBD、ESP、

DYC等)提供决策依据。当前路况识别主要有两类方法^[1-2]:基于传感器(光、声、微波、图像等)的路面直接检测方法和基于车辆动力学参数的方法。前者虽然能够获得较好的判别效果,但需要很多附加设备,使道路识别系统的结构复杂,而且提高了控制系统的成本,难以实现大规模的商业应用;基于车辆动力学参数的方法主要是根据 $\mu-s$ 曲线的形状

收稿日期:2009-08-11 修回日期:2009-10-19

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2007AA04Z206)、中国博士后科学基金计划资助项目(20080431189)和山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目(2008BS05003)

作者简介:杨福广,博士生,山东交通学院副教授,主要从事先进车辆控制研究, E-mail: fuguang_y@126.com

通讯作者:李贻斌,教授,博士生导师,主要从事智能机器人、先进车辆控制研究, E-mail: liyb@sdu.edu.cn

估算路面附着系数,其共同特点是都要实时估算路面的当前附着系数 μ 。文献[2~4]中, μ 都是在车辆加减过程中通过车轮的动力学方程直接计算,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,通过微分方法获得加(减)速度,因而将不可避免地引入噪声。为减小直接计算引入的噪声,文献[5~6]中设计了高阶滑模观测器观测纵向力和纵向附着系数,文献[7]使用最小二乘法结合卡尔曼滤波技术估算地面附着系数。

本文提出一种在车辆制动过程利用扩张状态观测器(extended state observer,简称 ESO)实时估计路面纵向附着系数的方法。该方法将车轮动力学方程中与附着系数相关的项考虑成系统的扩张状态并进行估计,观测器的输入信号中除了控制量以外仅需要车轮的角速度信息。

1 1/4 车辆制动动力学模型

假设路面水平,忽略轮胎侧偏角、滚动阻力、风阻等影响,只考虑纵向特性,则 1/4 车辆制动过程动力学模型如图 1 所示。根据牛顿定律,该模型可描述为^[8]

$$\begin{cases} \frac{1}{4}m\dot{v} = F_x \\ J\dot{\omega} = F_x R - T_b \\ F_x = F_z \mu \\ F_z = \frac{1}{4}mg \end{cases} \quad (1)$$

式中 v ——车轮纵向线速度, m/s

ω ——车轮角速度, rad/s

m ——车辆质量, kg

R ——车轮转动半径, m

J ——车轮的转动惯量, kg·m²

T_b ——制动力矩, N·m

F_x ——地面与轮胎间的纵向摩擦力, N

μ ——轮胎与地面间的附着系数

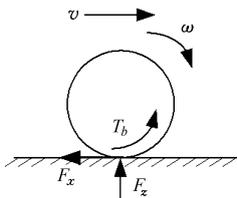


图 1 1/4 车辆制动动力学模型

Fig.1 Dynamic model of tire for braking

本文使用车辆动力学控制研究中应用比较广泛的 Magic 公式计算 μ ^[8]。在直线行驶工况下,轮胎的纵向力与纵向滑移率 s 及轮胎垂直载荷 F_z 之间

的关系表示为

$$\begin{cases} \mu(s, F_z) = D \sin(C \arctan(Bs(1-E) + E \arctan(Bs))) \\ D = a_1 F_z^2 + a_2 F_z \\ C = 1.65 \\ B = \frac{a_3 F_z^2 + a_4 F_z}{CDE^{a_5 F_z}} \\ E = a_6 F_z^2 + a_7 F_z + a_8 \end{cases} \quad (2)$$

式中 B ——刚度系数,影响 $s=0$ 处的斜率

C ——形状系数,影响整个曲线的形状

D ——峰值系数,影响 μ 峰值

E ——曲率系数,影响曲线的局部曲率变化

$a_1 \sim a_8$ ——根据实验数据拟合的常数

滑移率 s 定义为

$$s = \frac{|R\omega - v|}{\max(R\omega, v)} \quad (3)$$

依据文献[8]中参数,得到不同路况下轮胎纵向滑移率与纵向附着系数之间的关系如图 2 所示。

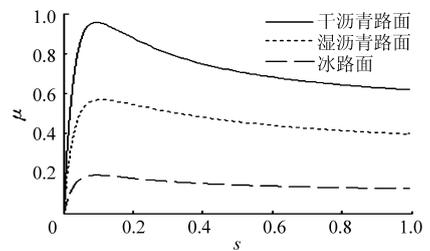


图 2 轮胎纵向 $\mu-s$ 曲线

Fig.2 Relation of $\mu-s$ for longitudinal of tire

2 基于扩张状态观测器的路面附着系数估计

2.1 观测器设计

根据式(1)有

$$\dot{\omega} = \frac{F_x R}{J} - \frac{T_b}{J} = \frac{mg\mu R}{4J} - \frac{T_b}{J} \quad (4)$$

即车轮制动系统可表达为一阶非线性系统。将式(4)中含有路面附着系数的项 $mg\mu(s, F_z)R/(4J)$ 考虑成系统的扰动 $f(\cdot)$,并作为系统的扩张状态变量 x_2 ,令

$$\begin{cases} \omega = x_1 \\ \frac{1}{J} = -b \\ T_b = u \\ x_2 = \frac{mgR\mu(s, F_z)}{4J} = f(\cdot) \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5),式(4)描述的一阶非线性系统可以扩张成新的系统^[9]

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + bu \\ y = x_1 \end{cases} \quad (6)$$

对于式(6),可以构造二阶非线性扩张状态观测器来观测其状态 x_1 和扩张状态 x_2 。

$$\begin{cases} e = \hat{x}_1 - y \\ \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 - \beta_{01} \text{fal}(e, a_1, \delta) + \hat{b} u \\ \dot{\hat{x}}_2 = -\beta_{02} \text{fal}(e, a_2, \delta) \end{cases} \quad (7)$$

式中 u, y ——观测器的输入信号

\hat{x}_1, \hat{x}_2 ——观测器的输出信号,分别是 x_1 和 x_2 的观测值

\hat{b} ——控制器增益 b 的估计值

$\text{fal}(\cdot)$ ——在原点附近具有线性段的连续幂次函数

$$\text{fal}(\varepsilon, a, \delta) = \begin{cases} \varepsilon \delta^{a-1} & (|\varepsilon| \leq \delta) \\ |\varepsilon|^a \text{sign}(\varepsilon) & (|\varepsilon| > \delta) \end{cases} \quad (8)$$

δ 为 $\text{fal}(\cdot)$ 线性段的长度。文献[9]已经严格证明,只要满足条件:① $f(\cdot)$ 有界,不需要限定 $f(\cdot)$ 连续性,② \hat{b} 可以确定,则通过合理地选择参数 $\beta_{01}, \beta_{02}, a_1, a_2$ 和 δ ,由式(7)构成的非线性观测器可以精确地观测系统(式(6))的状态变量 x_1 以及被扩张的状态变量 x_2 ,即

$$\begin{cases} \hat{x}_1 \rightarrow x_1 \\ \hat{x}_2 \rightarrow x_2 \end{cases} \quad (9)$$

显然在系统(式(4))中 $f(\cdot) = mg\mu(s, F_z)R/(4J)$ 满足条件①,而 \hat{b} 可以估算,满足条件②。另外观测器的输入信号 u 和 y 可以通过传感器测量,所以通过观测器可以得到 x_1 (轮速 ω) 和含有附着系数的项 x_2 的观测值 \hat{x}_1 和 \hat{x}_2 。根据

$$\hat{x}_2 = \frac{mg\mu R}{4J} \quad (10)$$

可以进一步计算得到路面纵向附着系数的估计值为

$$\hat{\mu} = \frac{4\hat{x}_2 J}{mgR} \quad (11)$$

2.2 观测器参数确定

依据文献[9]给出的扩张状态观测器参数设计的指导性建议及车轮独立制动系统的特点,选定控制周期 $dt = 0.001 \text{ s}$,确定观测器参数过程如下:

(1) 估计 $\hat{b} = -\frac{1}{J}$ 。

(2) 取 $a_1 = 0.5, a_2 = 0.25, \delta = 0.1$ 。

(3) 根据系统动力学特性,将 T_b 设置成一个确定数值;将 β_{02} 初始值置为一个较大的数,交叉调整 β_{01} 和 β_{02} 。最终确定 $\beta_{01} = 1.3 \times 10^3, \beta_{02} = 3.9 \times 10^5$ 。

3 仿真

为了检验观测器的有效性,对车辆的制动过程进行研究。使用上述扩张状态观测器的车辆制动系

统结构如图3所示。假设水平路面,忽略滚动阻力风阻等影响。车轮初始线速度 $v_0 = 120 \text{ km/h}$,初始滑移率 $s = 0, J = 2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, R = 0.3 \text{ m}, m = 1200 \text{ kg}$ 。

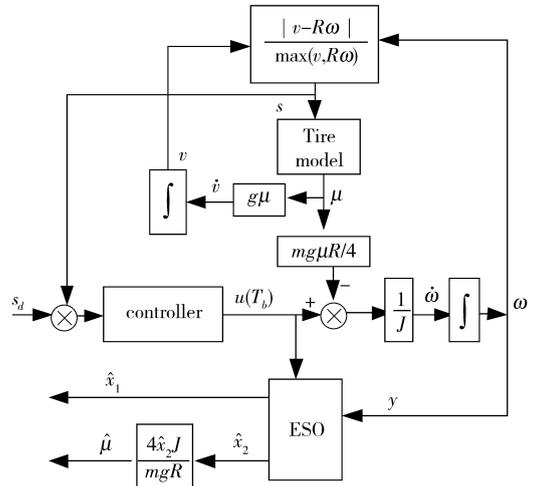


图3 制动过程中基于扩张状态观测器的附着系数估计框图

Fig. 3 Configuration of observer for μ based on ESO during braking process

3.1 标称参数条件下的仿真

分别在均匀冰路面、湿沥青路面、干沥青路面以及突变路面(路面依次是冰路面、干沥青路面、湿沥青路面、冰路面)进行单轮制动工况下的仿真试验。使用文献[8]的路面试数,冰路面时 $B = 9.8, C = 1.45, D = 0.1$;湿沥青路面时 $B = 15.8, C = 1.6, D = 0.62$;干沥青路面时 $B = 19.25, C = 1.65, D = 0.92$,各种路况下 $E = 0.6$ 。设定制动过程中车轮目标滑移率为 $s_d = 0.15$,使用自抗扰控制器作为制动控制器,得到的仿真结果如图4所示。可见,在均匀的路况下,观测的路面附着系数与实际路面附着系数精确吻合。仿真结果表明了这种观测方式的准确性、快速性。

3.2 参数摄动和传感器噪声情况下的仿真

考虑车辆参数的不确定性,令摄动后的轮胎载荷 $F'_z = F_z [1 + 0.1 \times (\text{rand}(1) - 0.5)]$ (F_z 为标称车轮载荷);考虑实际车轮的转速传感器含有一定的噪声,令传感器检测的车轮角速度 $\omega' = \omega [1 + 0.002 \times (\text{rand}(1) - 0.5)]$ (ω 为真实的车轮转速);其它参数不变,控制器不变;由于参数摄动和传感器噪声,估计的附着系数存在噪声,所以使用一阶惯性环节(时间常数 0.03 s)对估计的路面附着系数进行了滤波。仿真结果如图5所示。和图4比较可见,估计附着系数与实际附着系数吻合良好,表明了观测器对于内部参数摄动和外部的传感器噪声具有较强的鲁棒性。

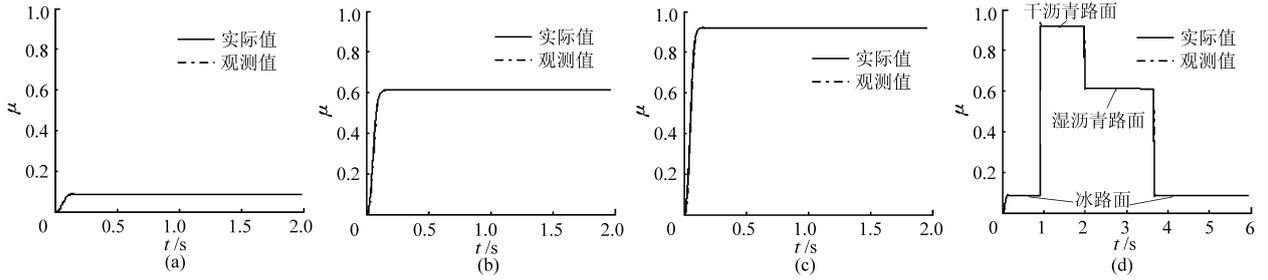


图 4 标称参数下的仿真结果

Fig. 4 Simulation results with normal parameters

(a) 冰路面 (b) 湿沥青路面 (c) 干沥青路面 (d) 突变路面

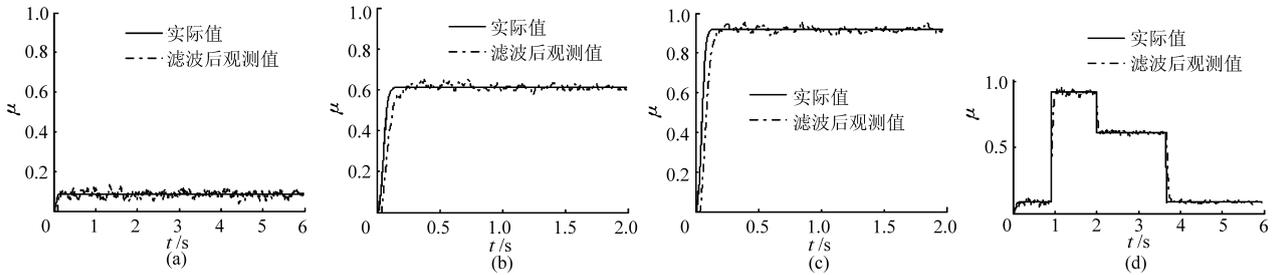


图 5 参数扰动和传感器噪声情况下的仿真结果

Fig. 5 Simulation results with parameters disturbed and sensor noise

(a) 冰路面 (b) 湿沥青路面 (c) 干沥青路面 (d) 突变路面

3.3 考虑参数扰动、传感器噪声以及期望滑移率 s_d 变化情况下的仿真

仿真初始条件和参数与 3.2 节相同,即仍然考虑参数扰动和传感器的噪声。有时为了保证车辆按照规划的横摆角速度运动,或进行制动减速,需要实时调整车轮的期望滑移率 s_d 。图 6a 是其中一个实例,对应的路面附着系数估计结果如图 6b 所示。可见,对于不同的均匀路面以及突变的路面条件,当给定变化的期望滑移率时,观测的路面附着系数与实际的路面附着系数都能够良好地吻合,表明观测器具有很强的鲁棒性和快速性。

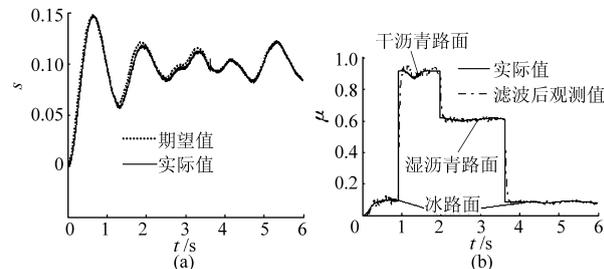


图 6 考虑参数扰动、传感器噪声和动态改变期望滑移率情况下的仿真结果(使用自抗扰控制器)

Fig. 6 Simulation results with dynamic s_d and parameters disturbed, sensor noise (with ADRC controller)

3.4 使用 PID 控制器情况下的仿真

当自抗扰控制器改为 PID 控制器,其它参数和

仿真条件与 3.3 节相同,得到的仿真结果如图 7。图 7a 与图 6a 比较可见,路面条件突变时,PID 控制器下系统的滑移率偏差较大,但是这并不影响路面附着系数(图 7b)的观测结果。表明设计的观测器是不依赖于控制器的。

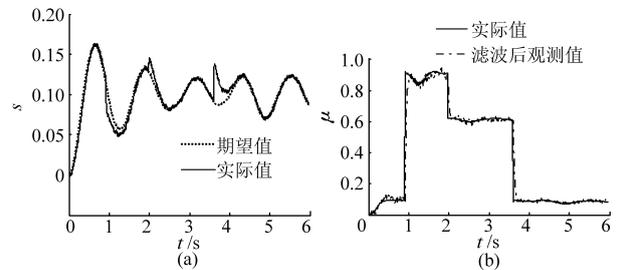


图 7 考虑参数扰动、传感器噪声和动态改变期望滑移率情况下的仿真结果(使用 PID 控制器)

Fig. 7 Simulation results with dynamic s_d and parameters disturbed, sensor noise (with PID controller)

4 结束语

为了给车辆主动安全系统提供决策依据,提出利用扩张状态观测器实时估计轮胎与地面间的纵向摩擦力,进而计算出路面利用附着系数的方法。观测器设计与控制器设计具有一定独立性,各种路面条件下制动过程的仿真结果表明了这种方法的有效性和鲁棒性。

(下转第 15 页)

- 5 王雄波. 基于模糊控制的电动助力转向系统的研究与开发[D]. 长沙: 湖南大学, 2008:38~44.
Wang Xiongbo. The study and development of electric power-assisted steering system based on fuzzy control[D]. Changsha: Hunan University, 2008:38~44. (in Chinese)
- 6 周冬林, 黄菊花, 曾群. 自适应模糊 PID 控制器在电动助力转向系统中的应用[J]. 制造业自动化, 2009,31(6):72~75.
Zhou Donglin, Huang Juhua, Zeng Qun. Application of fuzzy self-tuning PID controller in electric power steering system[J]. Manufacturing Automation, 2009,31(6):72~75. (in Chinese)
- 7 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000:209~212.
- 8 王树清, 戴连奎, 于玲. 过程控制工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005:60~67.
- 9 徐海清. 一种基于非线性 PID 加前馈控制方法的仿真研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004:31~35.
Xu Haiqing. Simulation research on a kind of nonlinear feed-forward PID control method[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2004:31~35. (in Chinese)
- 10 侯伯杰, 李小清, 周云飞, 等. 直线电动机伺服系统的复合前馈 PID 控制[J]. 机床与液压, 2009,37(2):56~58.
Hou Bojie, Li Xiaoqing, Zhou Yunfei, et al. The development of feed-forward plus PID controller for linear motor[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009,37(2):56~58. (in Chinese)

(上接第 9 页)

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, 2006,28(6):546~549.
Yu Zhuoping, Zuo Jianling, Zhang Lijun. A summary on the development status quo of tire-road friction coefficient estimation techniques[J]. Automotive Engineering, 2006,28(6):546~549. (in Chinese)
- 2 Yukihiisa Sasada. Development of the road surface condition sensing system[C] // International Conference on Intelligent Transportation Systems, Tokyo, 1999:14~19.
- 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, 2001,32(5):26~29.
Li Jun, Yu Fan, Zhang Jianwu. Fuzzy control of an ti-lock braking system based on road automat identification[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001,32(5):26~29. (in Chinese)
- 4 周斯加, 罗玉涛, 邓志君. 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, 2007,25(3):70~74.
- 5 ARabhi N K M, Sirdi A Elhajjaji. Estimation of contact forces and tire road friction[C] // 2007 Mediterranean Conference on Control and Automation, Athens Greece, 2007:1~6.
- 6 Carlos Canudas-de-Wit, Tsiotras P, Velenis E, et al. Dynamic friction models for road/tire longitudinal interaction[J]. Vehicle System Dynamics, 2003,39(3):189~226.
- 7 Ray L R. Nonlinear state and tire force estimation for advanced vehicle control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1995, 3(1):117~124.
- 8 齐志权. 汽车 ABS/TCS/ASS 集成系统中 ABS 控制技术的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2004.
Qi Zhiquan. Research on control technology of antilock braking system in integrated ABS/ASR/ACC system for motor vehicles [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2004. (in Chinese)
- 9 韩京清. 自抗扰控制技术——估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.