

文章编号:1008-1542(2020)02-0172-09

不同路况下路面附着系数实时估计

王 健¹, 杨 君¹, 于 蓬², 李爱娟¹, 魏 添²

(1. 山东交通学院汽车工程学院, 山东济南 250357; 2. 山东明宇新能源技术有限公司, 山东济南 271100)

摘要:为了准确估计不同路况下的路面附着系数,提高汽车行驶的安全性与稳定性,提出了一种在制动工况下基于前后轮轮速和制动力矩估计路面附着系数的方法。首先,考虑汽车前后轴荷转移,在 Matlab/Simulink 软件中完成建模操作,创建关于双轮车辆制动的动力学模型;其次,将控制目标确定为汽车前轮以及后轮的理想和实际滑移率,建立理想制动力矩滑模控制器,对于汽车滑模控制器存在的抖振现象,通过积分切换面对其进行处理;最后,以前后轮轮速和制动力矩作为输入进行扩张状态观测器的设计,利用这一观测器观测路面附着系数相关值。结果表明,各种路况中的路面附着系数都可以通过上述手段进行准确估计,扩张状态观测器能够抵抗外界干扰,鲁棒性强。将扩张状态观测器用于路面附着系数识别的良好结果可为汽车稳定性控制系统的设计提供参考。

关键词:车辆工程;路面附着系数估计;线性扩张状态观测器;外界干扰;不同路况

中图分类号:U461.1 **文献标识码:**A **doi:**10.7535/hbkd.2020yx02007

Real-time estimation of road friction coefficient in different road conditions

WANG Jian¹, YANG Jun¹, YU Peng², LI Aijuan¹, WEI Tian²

(1.School of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan, Shandong 250357, China; 2.Shandong Mingyu New Energy Technology Company Limited, Jinan, Shandong 271100, China)

Abstract: In order to accurately estimate the road adhesion coefficient under different road conditions and improve the safety and stability of vehicles, a method was proposed to estimate the road adhesion coefficient based on the front and rear wheels speed and braking torque under braking conditions. First, considering the transfer of front and rear axle load, the modelling was completed in Matlab/Simulink software to create a dynamic model of the two-wheel vehicle braking. Secondly, the control target was determined as the ideal and actual slip ratio of the front and rear wheels of the vehicle, and the ideal braking torque

收稿日期:2019-10-14;修回日期:2020-03-09;责任编辑:冯 民

基金项目:山东省重点研发计划项目(2017GGX50109,2018GGX105008);山东交通运输厅科技计划项目(2018B66);山东省高等学校科技计划项目(J17KB024,J18KA050);山东省高等学校青创科技支持计划项目(2019KJB019,2020KJB002);山东交通学院博士科研启动资金(BS2017001,BS2017003)

第一作者简介:王 健(1986—),男,山东潍坊人,副教授,博士,主要从事智能驾驶、主动安全方面的研究。

通讯作者:于 蓬高级工程师。E-mail:s_y_yupeng@163.com

王健,杨君,于蓬,等.不同路况下路面附着系数实时估计[J].河北科技大学学报,2020,41(2):172-180.

WANG Jian, YANG Jun, YU Peng, et al.Real-time estimation of road friction coefficient in different road conditions[J].Journal of Hebei University of Science and Technology,2020,41(2):172-180.

sliding mode controller was established. The chattering phenomenon of the sliding mode controller was properly dealt with through the integral switching surface. Finally, the front and rear wheel speed and braking torque were used as input to design the extended state observer, which is used to observe the correlation value of the road adhesion coefficient. The results show that the road adhesion coefficient in all kinds of road conditions can be accurately estimated by the above method, and the extended state observer can resist the external interference and has strong robustness. The successful application of the extended state observer provides the reference for the design of vehicle stability control system.

Keywords: vehicle engineering; road friction coefficient; linear extended state observer; external disturbance; different road conditions

汽车中的先进驾驶员辅助系统如自适应巡航控制(adaptive cruise control, ACC)、防抱死制动系统(anti-lock braking system, ABS)、驱动力控制系统(traction control system, TCS)和电子稳定程序(electronic stability program, ESP)等,令汽车在行驶过程中变得更加稳定和安全^[1]。要想做好安全控制工作,首先必须得到精确的路面附着系数^[2],然后利用先进驾驶员辅助系统来调整控制逻辑,使控制系统的性能充分展现^[3]。

当前附着系数的检测主要有以传感器为基础的两类手段。第一类是 Cause-based 手段,它按照路面的两方面情况(具体形态和物理特征)来识别具体的附着系数。识别时,它会通过光学传感器对路面的两种情况(吸光情况和散射光情况)进行测量。这一手段的优势是直接、操作简单,缺点是传感器价格高,无法应用于量产车中。第二类是 Effect-based 手段^[4-6],它按照车辆动力学响应对附着系数进行估算。这一手段的优势是车载传感器得到充分运用,花费成本少。文献[7-10]在估计汽车纵向力时,使用的是卡尔曼滤波器,利用两类情况(CUSUM 变化和通过 RLS 法计算得到的值)估计附着系数。文献[11]在估计附着系数时,使用的即是卡尔曼滤波算法。文献[12]先通过建立 1/4 车辆制动动力学模型,然后通过扩张状态观测器得到附着系数的大概值。和卡尔曼滤波等算法相比,此方法不但能够确保准确度,还不用对复杂 Jacobian 矩阵进行求解。

本文考虑车辆制动过程中的前后轴荷转移,创建关于双轮车辆制动的动力学模型,将控制目标确定为汽车前轮以及后轮的理想和实际滑移率,完成滑模控制器的创建操作,对汽车滑模控制器存在的抖振现象,通过积分切换面进行妥善处理,再进行扩张状态观测器的设计,利用观测器观测路面附着系数相关值。与文献[8]相比,该方法考虑前后轴荷转移对附着系数估计的影响,设计参数更少,计算效率更高。

1 双轮车辆制动动力学模型

1.1 整车模型

当对行驶的汽车进行动力学分析时,需要提出 4 个假设,即汽车受到的 4 个方面影响可以被忽略。这 4 个方面影响首先是 3 类系统带来的影响,即悬架系统、传动系统、转向系统;其次是轮胎滚动以及空气阻力带来的影响;再者是轴荷侧向转移的影响;最后是路面平整度的影响。

图 1 中,行驶期间汽车的前非簧载质量以及质量高度依次用 m_f, m_r, h_f, h_r 表示,其簧上质量高度、悬挂质量以及质心到前后轴距离依次用 h_s, m_s, l_f, l_r 表示,地面对前后轮的反作用力以及汽车位移量依次用 F_{zf}, F_{zr}, x 表示。由图 1 可以得到动力学方程如下:

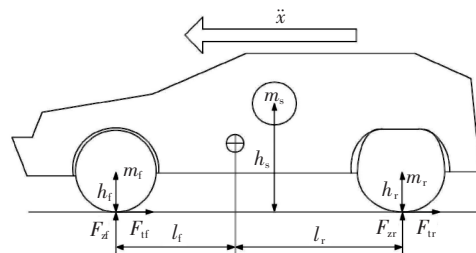


图 1 双轮车辆制动动力学模型
Fig.1 Braking dynamics model of a two-wheel vehicle

$$\dot{x} = V,$$

$$\dot{V} = -g \frac{\mu(\lambda_f)m_1 + \mu(\lambda_r)m_2}{m - \mu(\lambda_r)m_3 + \mu(\lambda_f)m_3},$$

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_f &= \frac{1}{2J_f}(-T_{bf} + \mu(\lambda_f)m_1R_\omega g - \mu(\lambda_f)m_3R_\omega \ddot{x}), \\ \dot{\omega}_r &= \frac{1}{2J_r}(-T_{br} + \mu(\lambda_r)m_2R_\omega g + \mu(\lambda_r)m_3R_\omega \ddot{x}), \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned} m_1 &= \frac{l_r}{l_f + l_r}m, \\ m_2 &= \frac{l_f}{l_f + l_r}m, \\ m_3 &= \frac{m_f h_f + m_s h_s + m_r h_r}{l_f + l_r}, \end{aligned}$$

式中: $\mu(\lambda_f)$ 表示前轮附着系数; $\mu(\lambda_r)$ 表示后轮附着系数;汽车质量、质心纵向速度、车轮半径依次用 m, V, R_ω 表示;前后轮角速度、转动惯量、制动力矩依次用 $\omega_f, \omega_r, J_f, J_r, T_{bf}, T_{br}$ 表示。

1.2 轮胎模型

当汽车处于制动工况时,需要对其纵向力进行预测。为此,在 Magic Formula 模型基础上建立 Burckhardt 模型^[13]。在此模型中,路面附着系数和两类值存在关联,即车速 V 和轮胎滑移率 λ ,见式(1)。

$$\mu(\lambda, V) = (C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda)e^{-C_4\lambda V}, \quad (1)$$

式中: C_1, C_2, C_3 为轮胎附着特征参数; C_4 为汽车行驶速度对附着特性的影响参数。不同路面情况下纵向滑移率与路面纵向附着系数之间的关系见图 2。

2 理想制动力矩控制器设计

求导汽车前轮以及后轮滑移率,可得:

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_f &= \frac{\dot{V}(1 - \lambda_f) - \dot{\omega}_f R_\omega}{V}, \\ \dot{\lambda}_r &= \frac{\dot{V}(1 - \lambda_r) - \dot{\omega}_r R_\omega}{V}, \end{aligned}$$

在车辆动力学方程中代入上式,得到:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= f_2(\lambda_f, \lambda_r), \\ \dot{\lambda}_f &= \frac{f_2(\lambda_f, \lambda_r)(1 - \lambda_f) - R_\omega f_3(\lambda_f, \lambda_r) + u_f}{V}, \\ \dot{\lambda}_r &= \frac{f_2(\lambda_f, \lambda_r)(1 - \lambda_r) - R_\omega f_4(\lambda_f, \lambda_r) + u_r}{V}, \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned} f_2(\lambda_f, \lambda_r) &= -g \frac{\mu(\lambda_f)m_1 + \mu(\lambda_r)m_2}{m - \mu(\lambda_f)m_3 + \mu(\lambda_r)m_3}, \\ f_3(\lambda_f, \lambda_r) &= \frac{1}{2J_f}(\mu(\lambda_f)m_1R_\omega g - \mu(\lambda_f)m_3R_\omega f_2), \\ f_4(\lambda_f, \lambda_r) &= \frac{1}{2J_r}(\mu(\lambda_r)m_2R_\omega g + \mu(\lambda_r)m_3R_\omega f_2). \end{aligned}$$

当汽车质量保持在一定范围内,其附着系数 $\in [0, 1]$ 时,有:

$$\begin{aligned} m_1^- &\leq m_1 \leq m_1^+, \\ m_2^- &\leq m_2 \leq m_2^+, \\ m_3^- &\leq m_3 \leq m_3^+, \\ m^- &\leq m \leq m^+, \end{aligned}$$

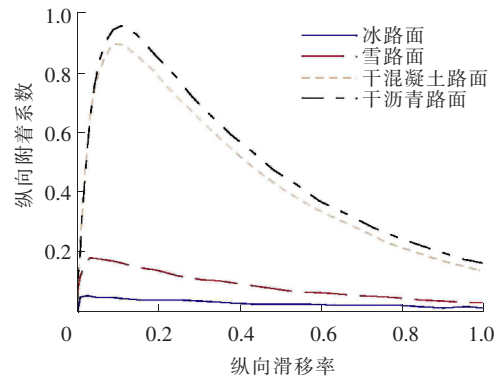


图 2 纵向滑移率与纵向附着系数之间关系曲线

Fig.2 Relation curve between longitudinal slip rate and longitudinal adhesion coefficient

$$0 \leq \mu(\lambda_f), \mu(\lambda_r) \leq 1。$$

其中 f_2, f_3, f_4 的变化范围为

$$-g \leq f_2(\lambda_f, \lambda_r) \leq 0,$$

$$0 \leq f_3(\lambda_f, \lambda_r) \leq \frac{R_\omega g}{2J_f}(m_1^+ + m_3^+),$$

$$\min[\frac{R_\omega g}{2J_r}(m_2^- - m_3^+), 0] \leq f_4 \leq \frac{R_\omega g}{2J_r}m_2^+,$$

可以得到 f_2, f_3, f_4 的近似值分别为

$$\hat{f}_2(\lambda_f, \lambda_r) = -0.5g,$$

$$\hat{f}_3(\lambda_f, \lambda_r) = \frac{R_\omega g}{4J_f}(m_1^+ + m_3^+),$$

$$\hat{f}_4(\lambda_f, \lambda_r) = \frac{1}{2}(\min[\frac{R_\omega g}{2J_r}(m_2^- - m_3^+), 0] + \frac{R_\omega g}{2J_r}m_2^+)。$$

令 $|f_2 - \hat{f}_2| \leq F_2, |f_3 - \hat{f}_3| \leq F_3, |f_4 - \hat{f}_4| \leq F_4$, 可得:

$$F_2 = 0.5g,$$

$$F_3 = \frac{R_\omega g}{4J_f}(m_1^+ + m_3^+),$$

$$F_4 = \frac{R_\omega g}{2J_r}m_2^+ - \frac{1}{2}(\min[\frac{R_\omega g}{2J_r}(m_2^- - m_3^+), 0] + \frac{R_\omega g}{2J_r}m_2^+)。$$

对滑模切换面进行定义, 令其为实际和目标滑移率之差, 则有:

$$S_1 = \tilde{\lambda}_f = \lambda_f - \lambda_{fd}, \quad (2)$$

$$S_2 = \tilde{\lambda}_r = \lambda_r - \lambda_{rd}, \quad (3)$$

式中: 前后轮实际和目标滑移率依次记为 $\lambda_f, \lambda_r, \lambda_{fd}, \lambda_{rd}$ 。对式(2)和式(3)求导得:

$$T_{eq,bf} = \frac{2J_f}{R_\omega}(\dot{\lambda}_{fd}V - \hat{f}_2(\lambda_f, \lambda_r)(1 - \lambda_f) + R_\omega \hat{f}_3(\lambda_f, \lambda_r)),$$

$$T_{eq,rf} = \frac{2J_r}{R_\omega}(\dot{\lambda}_{rd}V - \hat{f}_2(\lambda_f, \lambda_r)(1 - \lambda_r) + R_\omega \hat{f}_4(\lambda_f, \lambda_r))。$$

由此便得到前后轮制动力矩:

$$T_b = T_{eq,b} - k \text{sign } S。$$

作为切换面, 必须达到下列不等式的条件, 即

$$S\dot{S} \leq 0,$$

由此得到前后轮理想制动力矩:

$$T_{bf} = \frac{2J_f}{R_\omega}(\dot{\lambda}_{fd}V - \hat{f}_2(\lambda_f, \lambda_r)(1 - \lambda_f) + R_\omega \hat{f}_3(\lambda_f, \lambda_r) - (F_f(\lambda_f, \lambda_r) + \eta_1) \text{sign } S_1),$$

$$T_{br} = \frac{2J_r}{R_\omega}(\dot{\lambda}_{rd}V - \hat{f}_2(\lambda_f, \lambda_r)(1 - \lambda_r) + R_\omega \hat{f}_4(\lambda_f, \lambda_r) - (F_r(\lambda_f, \lambda_r) + \eta_2) \text{sign } S_2),$$

其中:

$$F_f(\lambda_f, \lambda_r) = F_2(1 - \lambda_f) + R_\omega F_3,$$

$$F_r(\lambda_f, \lambda_r) = F_2(1 - \lambda_r) + R_\omega F_4,$$

式中 η_1 和 η_2 都是正数。

在滑模控制里使用 $\text{sat}(S/\varphi)$ 函数, 同时通过积分切换面进行滑模控制器的设计, 便能够对抖振问题进行妥善处理^[14-15]。

$$S_1 = \lambda_f - \lambda_{fd} + \xi_1 \int (\lambda_f - \lambda_{fd}) dt,$$

$$S_2 = \lambda_r - \lambda_{rd} + \xi_2 \int (\lambda_r - \lambda_{rd}) dt,$$

式中 ξ_1 和 ξ_2 为常数。采用积分切换面之后得到:

$$T_{bf} = \frac{2J_f}{R_\omega} ((\dot{\lambda}_{fd} - \xi_1 \tilde{\lambda}_f) V - \hat{f}_2(\lambda_f, \lambda_r)(1 - \lambda_f) + R_\omega \hat{f}_3(\lambda_f, \lambda_r) - (F_f(\lambda_f, \lambda_r) + \eta_1) \text{sat}(\frac{\tilde{\lambda}_f + \xi_1 \int \tilde{\lambda}_f dt}{\varphi_1})),$$

$$T_{br} = \frac{2J_r}{R_\omega} ((\dot{\lambda}_{rd} - \xi_2 \tilde{\lambda}_r) V - \hat{f}_2(\lambda_f, \lambda_r)(1 - \lambda_r) + R_\omega \hat{f}_4(\lambda_f, \lambda_r) - (F_r(\lambda_f, \lambda_r) + \eta_2) \text{sat}(\frac{\tilde{\lambda}_r + \xi_2 \int \tilde{\lambda}_r dt}{\varphi_2})),$$

式中 φ_1 和 φ_2 为常数。

3 路面附着系数观测器的设计

通过扩张状态观测器可以观测到 2 类情况:首先是未知扰动的新状态;其次是模型不确定性^[16-18]。当路面附着系数只用控制输入以及量测输出时,此手段十分适用。通过这一观测器来观测路面系数相关值,其中观测器输入有 2 个,即制动力信号和轮速信号,观测器输出指的是路面附着系数。在确定输入和输出之后,便能够进行二阶扩张状态观测器的设计。

通过双轮车辆制动动力学模型能够得到式(4)。

$$\begin{cases} \dot{\omega}_f = \frac{1}{2J_f} (-T_{bf} + \mu(\lambda_f)m_1R_\omega g - \mu(\lambda_f)m_3R_\omega \ddot{x}), \\ \dot{\omega}_r = \frac{1}{2J_r} (-T_{br} + \mu(\lambda_r)m_2R_\omega g + \mu(\lambda_r)m_3R_\omega \ddot{x}), \end{cases} \quad (4)$$

变化式(4)形式得到:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_f = \frac{1}{2J_f} \mu(\lambda_f)(m_1R_\omega g - m_3R_\omega \ddot{x}) + \frac{-1}{2J_f} T_{bf}, \\ \dot{\omega}_r = \frac{1}{2J_r} \mu(\lambda_r)(m_2R_\omega g + m_3R_\omega \ddot{x}) + \frac{-1}{2J_r} T_{br}. \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)路面附着系数项作为扩张状态变量,让 $\omega_f = x_1$; $\frac{1}{2J_f} \mu(\lambda_f)(m_1R_\omega g - m_3R_\omega \ddot{x}) = x_2$; $\omega_r = x_3$;

$$\frac{-1}{2J_f} = b_1; \frac{1}{2J_r} \mu(\lambda_r)(m_2R_\omega g + m_3R_\omega \ddot{x}) = x_4; \frac{-1}{2J_r} = b_2; T_{bf} = u_1; T_{br} = u_2。$$

将式(5)变为 2 个积分器串联型系统,则有:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + b_1 u_1, \\ y_1 = x_1, \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_3 = x_4 + b_2 u_2, \\ y_2 = x_3. \end{cases} \quad (7)$$

以式(6)中系统为例,利用二阶线性扩张状态观测器便能够获得 x_1, x_2 的值。

$$\begin{cases} e(k) = z_1(k) - y_1(k), \\ \beta_{01} = 2\omega_0, \\ \beta_{02} = \omega_0^2, \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h(z_2(k) - \beta_{01}e(k) + b_0 u_1(k)), \\ z_2(k+1) = z_2(k) + (-\beta_{02}e(k)), \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中:观测器带宽用 ω_0 表示;输入和输出信号依次用 u_1, y_1, z_1, z_2 表示;状态和扩张状态以及控制增益

及其估计值依次用 x_1, x_2, b_1, b_0 表示。如此便可以对 x_3, x_4 进行观测值求解操作。

利用线性扩张状态观测器能够估计附着系数值,对式(6)中系统而言,能够获得以下公式:

$$\begin{cases} \omega_f = z_1, \\ \frac{1}{2J_f} \mu(\lambda_f) (m_1 R_\omega g - m_3 R_\omega \ddot{x}) = z_2, \end{cases} \quad (9)$$

其中 x_1, x_2 观测值分别记为 z_1, z_2 , 由此得到:

$$\begin{cases} \omega_r = z_3, \\ \frac{1}{2J_r} \mu(\lambda_r) (m_2 R_\omega g + m_3 R_\omega \ddot{x}) = z_4, \end{cases} \quad (10)$$

其中 x_3, x_4 观测值分别记为 z_3, z_4 , 通过式(9)、式(10)对汽车前后轮路面附着系数进行求解,其值如下:

$$\begin{cases} \mu(\lambda_f) = \frac{2J_f z_2}{m_1 R_\omega g - m_3 R_\omega \ddot{x}}, \\ \mu(\lambda_r) = \frac{2J_r z_4}{m_2 R_\omega g + m_3 R_\omega \ddot{x}}. \end{cases} \quad (11)$$

4 路面附着系数估计仿真验证

为了对本文采用的路面附着系数估计方法进行验证,采用仿真软件 ADAMS/Car 进行虚拟仿真试验。其中车辆有关参数为 $m = 1\ 500\ \text{kg}, m_s = 1\ 285\ \text{kg}, m_f = 96\ \text{kg}, m_r = 119\ \text{kg}, l_f = 1.186\ \text{m}, l_r = 1.258\ \text{m}, h_f = 0.3\ \text{m}, h_r = 0.3\ \text{m}, R_\omega = 0.326\ \text{m}, J_f = 1.7\ \text{kg} \cdot \text{m}^2, J_r = 1.7\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。整车试验模型如图 3 所示。

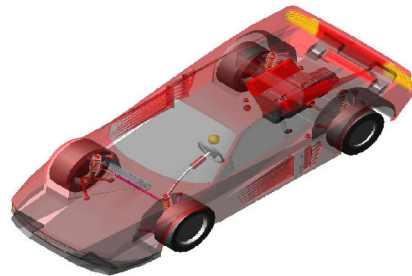


图 3 ADAMS/Car 整车试验模型
Fig.3 ADAMS/Car vehicle test model

利用路面编辑器展开仿真试验。当知道汽车前后轮 2 类值(即轮速信号和制动力矩)时,便可以通过二阶线性扩张状态观测器估计路面附着系数。前轮路面附着系数估计框图见图 4。

4.1 理想制动力矩控制器仿真

当车辆行驶时,理想制动力矩控制器可以保证车辆充分利用路面附着系数,此时将汽车前后轮理想滑移率设定成一阶系统阶跃响应:

$$\lambda_{fd} = \lambda_{rd} = \frac{3}{s + 20}.$$

汽车行驶于干沥青路面,初速度为 $30\ \text{m/s}$,此时汽车前轮以及后轮的滑移率关系见图 5。

从图 5 可以看出,车辆实际前后轮滑移率能够跟踪理想滑移率的变化。图 6 显示了汽车前轮和后轮的制动力矩情况。

车辆以 $30\ \text{m/s}$ 初速度在对接路面进行制动,其中 $0 \sim 2.5\ \text{s}$ 车辆行驶在湿沥青路面, $2.5 \sim 7\ \text{s}$ 行驶在雪地路面,其前后轮滑移率的变化曲线如图 7 所示,图 8 显示了汽车前轮和后轮的制动力矩情况。

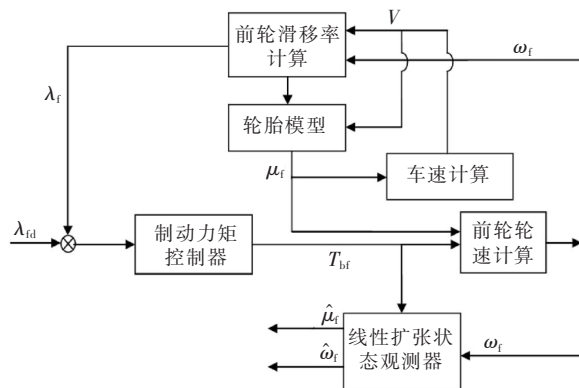


图 4 前轮路面附着系数估计框图
Fig.4 Estimation block diagram of front wheel road adhesion coefficient

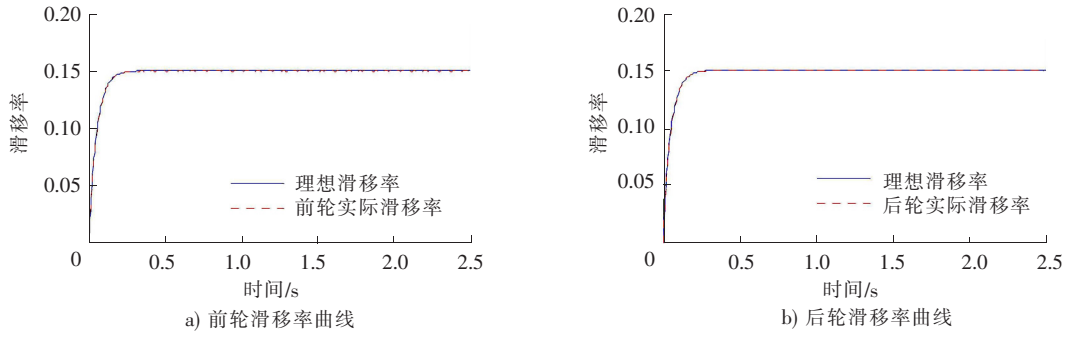


图 5 单一路面前后轮滑移率曲线

Fig.5 Front and rear wheel slip rate curve on single pavement

4.2 路面附着系数估计

利用线性扩张状态观测器估计路面附着系数时,需要按照系统输出跟踪目标两方面情况对观测器的带宽进行调整,这两方面情况首先是稳态要求,其次是速度要求。此处带宽和响应速度成正比关系,但必须确保带宽不会太高,否则系统会出现超调震荡的情况^[19-20]。针对之前仿真时的 2 类路面情况,此处观测器带宽取值为 100,当汽车在干沥青路面行驶时,路面附着系数具体值如图 9 所示。

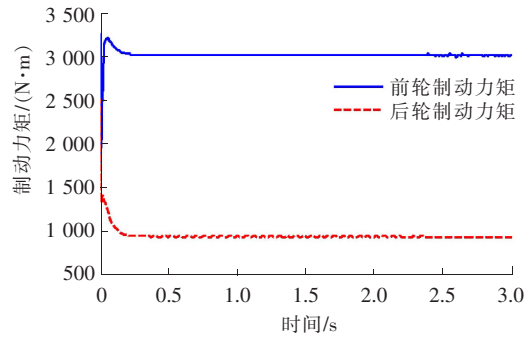


图 6 单一路面前后轮制动力矩

Fig.6 Braking torque of front and rear wheels on single road pavement

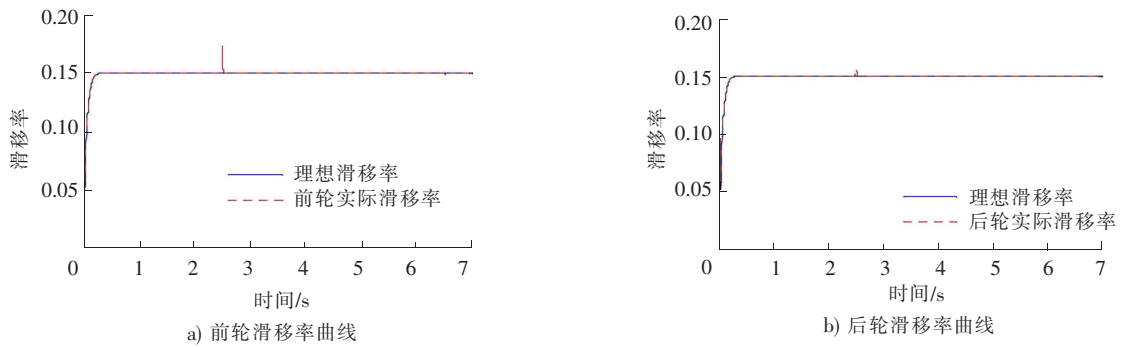


图 7 对接路面前后轮滑移率曲线

Fig.7 Front and rear wheel slip rate curve on variational road

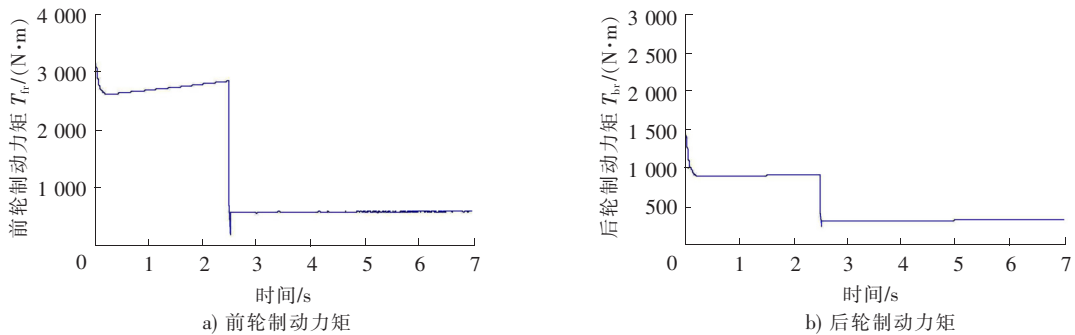


图 8 对接路面前后轮制动力矩

Fig.8 Braking torque of front and rear wheels on butt pavement

当路面一段为湿沥青、一段为雪地时,汽车在这两类路面过渡时的路面附着系数见图 10。

由上述仿真结果可知,通过线性扩张状态观测器可以对路面附着系数进行精确估计。汽车制动期间,轮速信号中通常存在白噪声,此时假设白噪声均值和方差分别为 0 和 1,当观测器参数固定时,估计对接路面附着系数,具体结果如图 11 所示。

通过图 11 可知,当轮速传感器信号中有白噪声时,可以通过线性扩张状态观测器估计路面附着系数。此时估计值存在噪声干扰,要消除这一干扰,需要对其进行滤波处理,图 12 显示了具体结果。

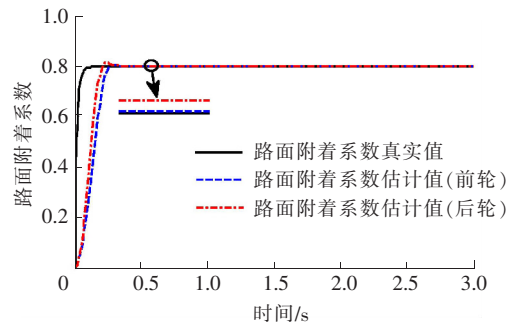
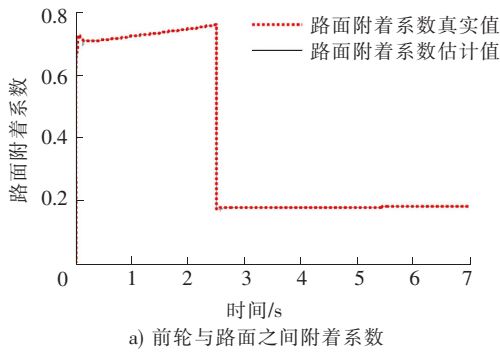
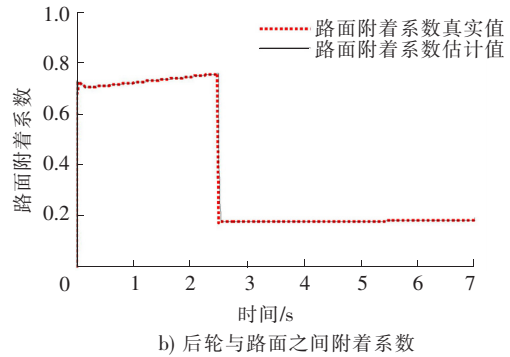


图 9 单一路面附着系数估计

Fig.9 Estimation of adhesion coefficient on single pavement



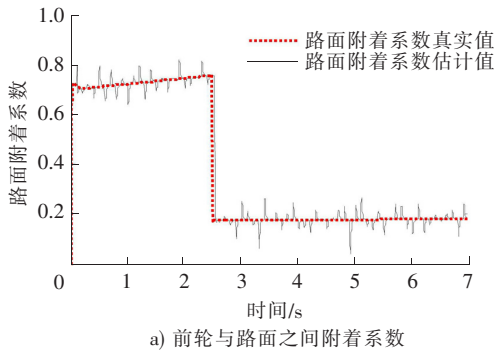
a) 前轮与路面之间附着系数



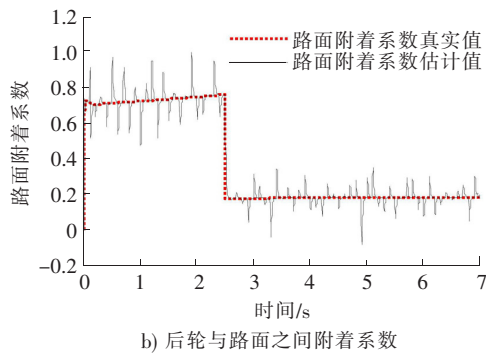
b) 后轮与路面之间附着系数

图 10 对接路面附着系数估计

Fig.10 Estimation of adhesion coefficient on butt pavement



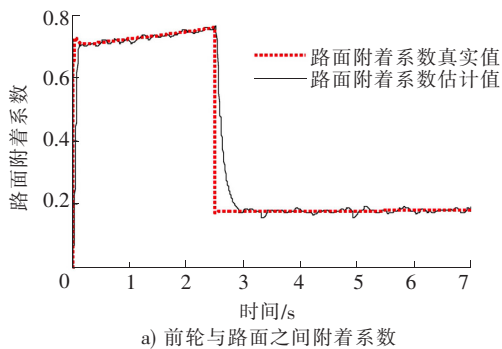
a) 前轮与路面之间附着系数



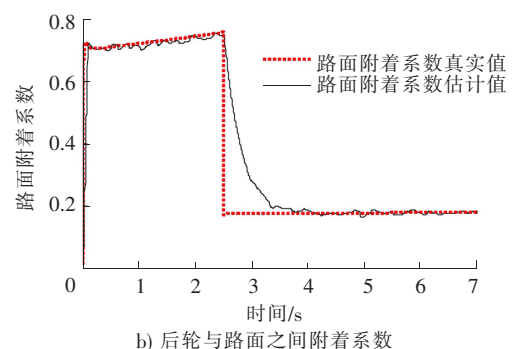
b) 后轮与路面之间附着系数

图 11 存在噪声干扰时路面附着系数估计

Fig.11 Estimation of road adhesion coefficient in the presence of noise interference



a) 前轮与路面之间附着系数



b) 后轮与路面之间附着系数

图 12 滤波后路面附着系数估计

Fig.12 Estimation of road adhesion coefficient after filtering

由图 12 可知,路面附着系数得到滤波处理后,估计值和实际值更加接近,但滤波处理后,路面附着系数估计值出现了延迟问题。

5 结 论

本文考虑汽车前后轴荷转移,将控制目标确定为汽车前轮以及后轮的理想和实际滑移率,然后完成滑模控制器的设计。在进行二阶线性扩张状态观测器的设计时,提出将前后轮轮速和制动力矩当作该观测器的输入,利用这一观测器来观测附着系数相关值。结论如下:1)以双轮车辆制动动力学模型为基础,通过线性扩张状态观测器估计路面附着系数值,方法简单可行;2)采用饱和函数及积分切换面能够消除滑模变结构控制抖振问题;3)线性扩张状态观测器的观测能力较强,同时具有良好的鲁棒性。当汽车在不同路况行驶时,路面附着系数都能够通过上述方法进行估计。扩张状态观测器能够抵抗外界干扰,鲁棒性强。本文未开展不同路面上路面附着系数估计的实车实验,今后将继续采用线性扩张状态观测器对汽车的转向工况以及转向、制动联合运行工况下的路面附着系数进行实时估计,为车辆稳定性控制系统的设计提供参考。

参考文献/References:

- [1] ISERMANN R, MANNALE R, SCHMITT K. Collision-avoidance systems PRORETA: Situation analysis and intervention control[J]. *Control Engineering Practice*, 2012, 20(11):1236-1246.
- [2] 李刚, 解瑞春, 卫绍元, 等. 基于双容积卡尔曼滤波的车辆状态与路面附着系数估计[J]. *中国科学: 技术科学*, 2015, 45(4):403-414.
LI Gang, XIE Ruichun, WEI Shaoyuan, et al. Vehicle state and road friction coefficient estimation based on double cubature Kalman filter[J]. *Science China: Technological Sciences*, 2015, 45(4):403-414.
- [3] 杨财, 李亮, 宋健, 等. 基于轮胎力观测器的路面附着系数识别算法[J]. *中国机械工程*, 2009, 20(7):873-876.
YANG Cai, LI Liang, SONG Jian, et al. Road friction coefficient estimation algorithm based on tire force observer[J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(7):873-876.
- [4] 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 of tire-road friction coefficient estimation techniques[J]. *Automotive Engineering*, 2006, 28(6):546-549.
- [5] 袁朝春, 张龙飞, 陈龙. 路面附着系数识别方法发展现状综述及展望[J]. *机械制造与自动化*, 2018(2):1-4.
YUAN Chaochun, ZHANG Longfei, CHEN Long. Summary and prospect of development of road coefficient identification methods[J]. *Machine Building & Automation*, 2018(2):1-4.
- [6] 王博, 卢萍萍, 管欣, 等. 路面附着系数识别方法发展现状综述[J]. *汽车技术*, 2014(8):1-7.
WANG Bo, LU Pingping, GUAN Xin, et al. A review on the development status of road adhesion coefficient identification approach[J]. *Automobile Technology*, 2014(8):1-7.
- [7] 赵又群, 林菜. 基于虚拟试验的路面附着系数估计[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2011, 41(2):309-315.
ZHAO Youqun, LIN Fen. Estimation of road pavement adhesion factor based on virtual experiment[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2011, 41(2):309-315.
- [8] 林菜, 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. Unscented Kalman filter for road friction coefficient estimation[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2013, 45(7):115-120.
- [9] 李刚, 解瑞春, 李宁, 等. 基于卡尔曼滤波的车辆状态与路面附着估计[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(8):129-135.
LI Gang, XIE Ruichun, LI Ning, et al. Estimation of vehicle state and road adhesion coefficient based on Kalman filter[J]. *Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)*, 2014, 42(8):129-135.
- [10] 刘万里, 彭冲, 韩家伟. 基于轮边驱动电动汽车轮胎力估计的路面附着系数估算[J]. *汽车实用技术*, 2018(10):35-38.
LIU Wanli, PENG Chong, HAN Jiawei. Estimate tire-road friction coefficient based on tire force estimation of the wheel drive electric vehicle[J]. *Automobile Applied Technology*, 2018(10):35-38.
- [11] WENZEL T A, BURNHAM K J, BLUNDELL M V, et al. Dual extended Kalman filter for vehicle state and parameter estimation[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2006, 44(2):153-171.
- [12] 杨福广, 李贻斌, 阮久宏, 等. 基于扩张状态观测器的路面附着系数实时估计[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(8):6-9.
YANG Fuguang, LI Yibin, RUAN Jiuhong, et al. Real-time estimation of tire road friction coefficient based on extended state observer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(8):6-9.
- [13] RAY L. Nonlinear tire force estimation and road friction identification: Simulation and experiments[J]. *Automatica*, 1997, 33(10):1819-1833.
- [14] HARIFI A, AGHAGOLZADEH A, ALIZADEH G, et al. Designing a sliding mode controller for slip control of antilock brake systems[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2008, 16(6):731-741.
- [15] 王其东, 刘伟, 陈无畏, 等. 基于路面识别的汽车稳定系统滑模控制[J]. *汽车工程*, 2018, 40(1):82-90.
WANG Qidong, LIU Wei, CHEN Wuwei, et al. Sliding mode control of vehicle electronic stability program based on road identification[J]. *Automotive Engineering*, 2018, 40(1):82-90.
- [16] HUANG Y, HAN J Q. Analysis and design for nonlinear continuous extended state observer[J]. *Chinese Bulletin*, 2000, 45(21):1938-1944.
- [17] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference. Denver:[s.n.], 2003:4989-4996.
- [18] 陈志翔, 高钦和. 线性/非线性切换扩张状态观测器[J]. *控制理论与应用*, 2019, 36(6):902-908.
CHEN Zhixiang, GAO Qinhe. Linear/nonlinear switching extended state observer[J]. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(6):902-908.
- [19] 邵星灵, 王宏伦. 线性扩张状态观测器及其高阶形式的性能分析[J]. *控制与决策*, 2015, 30(5):815-822.
SHAO Xingling, WANG Honglun. Performance analysis on linear extended state observer and its extension case with higher extended order[J]. *Control and Decision*, 2015, 30(5):815-822.
- [20] 孙佃升, 章跃进. 线性扩张状态观测器的改进及观测精度分析[J]. *国防科技大学学报*, 2017, 39(6):111-117.
SUN Diansheng, ZHANG Yuejin. Improvement and observation accuracy analysis of linear extended state observer[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2017, 39(6):111-117.