



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103661398 B

(45) 授权公告日 2015. 12. 30

(21) 申请号 201310721803. 1

(22) 申请日 2013. 12. 24

(73) 专利权人 东南大学

地址 221700 江苏省徐州市丰县中阳大道
18 号

(72) 发明人 李旭 陈伟 宋翔 徐启敏

(74) 专利代理机构 江苏永衡昭辉律师事务所
32250

代理人 王斌

(51) Int. Cl.

B60W 40/105(2012. 01)

(56) 对比文件

CN 102009654 A, 2011. 04. 13,

CN 102556075 A, 2012. 07. 11,

CN 102529976 A, 2012. 07. 04,

CN 103279675 A, 2013. 09. 04,

KR 101315023 B1, 2013. 10. 14,

J. Steacute

phant 等. 《Evaluation of a sliding

mode observer for vehicle sideslip angle》. 《Control Engineering Practice》. 2007, 第 15 卷 (第 7 期), 900-910.

ZONG Changfu 等. 《Dual Extended Kalman Filter for Combined Estimation of Vehicle State and Road Friction》. 《CHINESE JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING》. 2013, 第 26 卷 (第 02 期), 313-324.

赵林辉等. 《一种车辆状态滑模观测器的设计方法》. 《电机与控制学报》. 2009, 第 13 卷 (第 4 期), 565-570.

审查员 王钰沛

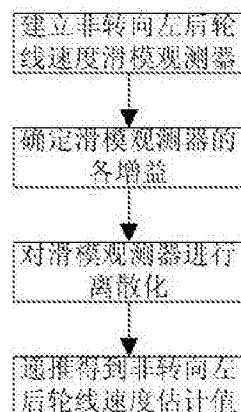
权利要求书3页 说明书13页 附图3页

(54) 发明名称

一种基于滑模观测器的车辆非转向左后轮线速度估计方法

(57) 摘要

本发明提出了一种基于滑模观测器的车辆非转向左后轮线速度估计方法,适用于前轮为转向轮、后轮为非转向轮的四轮汽车左后轮线速度估计。本方法首先对非转向左后轮建立车轮动力学模型,然后基于此模型设计了左后轮线速度滑模观测器,再根据稳定性原理确定滑模观测器的各增益,接着对设计好的左后轮线速度滑模观测器进行离散化处理,最后通过滑模观测器的估计递推实现了对车辆非转向左后轮线速度的准确估计,具有抗干扰能力强、精度高、成本低以及实时性强的特点。



1. 一种基于滑模观测器的车辆非转向左后轮线速度估计方法,其特征在于:具体步骤如下:

1) 建立非转向左后轮线速度滑模观测器

当车辆加速或匀速运行时,对于左后轮,采用车轮动力学模型,车轮动力学模型的状态空间方程为:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= f_1(x_1, x_2) + \frac{T_{lR}}{J_l} \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2)\end{aligned}\quad (1)$$

式(1)中 x_1 和 x_2 是滑模观测器的状态量,并且 $x_1 = \omega_{lR}$, $x_2 = v_{x_{lR}}$, ω_{lR} 表示左后轮的角速度, $v_{x_{lR}}$ 表示左后轮的线速度, T_{lR} 为左后轮的扭矩, J_l 为左后轮转动惯量,

$f_1(x_1, x_2) = -\frac{R_{lR}C_{lx}}{J_l}(1 - \frac{x_2}{R_{lR}x_1})$, $f_2(x_1, x_2) = \frac{C_{lx}}{m_l}(1 - \frac{x_2}{R_{lR}x_1})$, 在 $f_1(x_1, x_2)$ 和 $f_2(x_1, x_2)$ 的表达式中, R_{lR} 为左后轮的有效半径, C_{lx} 为左后轮的纵向轮胎刚度, m_l 为左后轮 1/4 车辆模型的等效质量;

左后轮角速度 x_1 可以通过角速度传感器测得,而左后轮线速度 x_2 无法直接测得,需要通过滑模观测器进行估计;

对式(1)所示车轮动力学模型,建立如下的滑模观测器:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_1 &= f_1(\hat{x}_1, \hat{x}_2) + l_1 s_1 + k_1 \operatorname{sgn}(s_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 &= f_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2) + \tau_1 \operatorname{sgn}(s_1)\end{aligned}\quad (2)$$

式(2)中, $\hat{x}_1$ 和 $\hat{x}_2$ 分别表示 x_1 和 x_2 的估计值, l_1 是滑模面之外的误差收敛增益, k_1 和 τ_1 则表示滑模面上的误差收敛增益, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 表示 sign 函数,滑动函数 s_1 定义为可测量状态 x_1 和观测器估计值 $\hat{x}_1$ 之间的差值,即:

$$s_1 = x_1 - \hat{x}_1 \quad (3)$$

当车辆减速运行时,对于左后轮,采用车轮动力学模型,车轮动力学模型的状态空间方程为:

$$\begin{aligned}\dot{x}_3 &= f_3(x_3, x_4) + \frac{T_{lR}}{J_l} \\ \dot{x}_4 &= f_4(x_3, x_4)\end{aligned}\quad (4)$$

式(4)中 x_3 和 x_4 是滑模观测器的状态量,并且 $x_3 = \omega_{lR}$, $x_4 = v_{x_{lR}}$,

$f_3(x_3, x_4) = -\frac{R_{lR}C_{lx}}{J_l}(\frac{R_{lR}x_4}{x_3} - 1)$, $f_4(x_3, x_4) = \frac{C_{lx}}{m_l}(\frac{R_{lR}x_4}{x_3} - 1)$;

左后轮角速度 x_3 可以通过角速度传感器测得,而左后轮线速度 x_4 无法直接测得,需要通过滑模观测器进行估计;

对式 (4) 所示车轮动力学模型, 建立如下的滑模观测器 :

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_3 &= f_3(\hat{x}_3, \hat{x}_4) + l_2 s_2 + k_2 \operatorname{sgn}(s_2) \\ \dot{\hat{x}}_4 &= f_4(\hat{x}_3, \hat{x}_4) + \tau_2 \operatorname{sgn}(s_2)\end{aligned}\quad (5)$$

式 (5) 中, $\hat{x}_3$ 和 $\hat{x}_4$ 分别表示 x_3 和 x_4 的估计值, l_2 是滑模面之外的误差收敛增益, k_2 和 τ_2 则表示滑模面上的误差收敛增益, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 表示 sign 函数, 滑动函数 s_2 定义为可测量状态 x_3 和观测器估计值 $\hat{x}_3$ 之间的差值, 即 :

$$s_2 = x_3 - \hat{x}_3 \quad (6)$$

为了避免符号函数引起过度的震荡, 在实际估计过程中, 上述式 (2) 和式 (5) 中出现的 $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 函数用下面的 $\operatorname{sgn}_{\text{eq}}(\cdot)$ 函数取代,

$$\begin{aligned}\operatorname{sgn}_{\text{eq}}(s_1) &= \tanh(\mu s_1) \\ \operatorname{sgn}_{\text{eq}}(s_2) &= \tanh(\mu s_2)\end{aligned}\quad (7)$$

其中 $\tanh(\cdot)$ 是双曲正切函数, μ 是一个用来调整双曲正切函数倾斜度的设计参数 ;

2) 确定滑模观测器的各个增益

对于式 (2) 和式 (5) 所表示的滑模观测器, 增益 l_1 、 k_1 、 τ_1 、 l_2 、 k_2 和 τ_2 由下面的式子确定

$$l_1 > \frac{\partial f_1}{\partial x_1}, \quad k_1 > \left| \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \tilde{x}_2 \right| + \left| \frac{T_{IR}}{J_l} \right| + \eta_1 \quad (8)$$

$$l_2 > \frac{\partial f_3}{\partial x_3}, \quad k_2 > \left| \frac{\partial f_3}{\partial x_4} \tilde{x}_4 \right| + \left| \frac{T_{IR}}{J_l} \right| + \eta_2 \quad (9)$$

$$\tau_1 = \tau_2 = 0 \quad (10)$$

式 (8) 和式 (9) 中, $\frac{\partial f_1}{\partial x_1}$ 表示 $f_1(x_1, x_2)$ 对 x_1 求偏导数, $\frac{\partial f_1}{\partial x_2}$ 表示 $f_1(x_1, x_2)$ 对 x_2 求偏导数,

$\frac{\partial f_3}{\partial x_3}$ 表示 $f_3(x_3, x_4)$ 对 x_3 求偏导数, $\frac{\partial f_3}{\partial x_4}$ 表示 $f_3(x_3, x_4)$ 对 x_4 求偏导数, $\tilde{x}_2 = x_2 - \hat{x}_2$, $\tilde{x}_4 = x_4 - \hat{x}_4$,

η_1 和 η_2 为任意给定的正数 ;

3) 进行离散化的估计递推

在实际的估计过程中, 需要采用离散化的估计递推形式, 为此将加速或匀速情况下左后轮线速度滑模观测器和减速情况下左后轮线速度滑模观测器进行离散化处理 ;

在车辆加速或匀速情况下, 左后轮线速度滑模观测器的离散化形式为 :

$$\begin{aligned}\hat{x}_1(k) &= \hat{x}_1(k-1) - \frac{TR_{IR}C_k}{J_l} \left(1 - \frac{\hat{x}_2(k-1)}{R_{IR}\hat{x}_1(k-1)} \right) \\ &\quad + Tl_1(\omega'_{IR}(k-1) - \hat{x}_1(k-1)) + Tk_1 \tanh(\mu\omega'_{IR}(k-1) - \mu\hat{x}_1(k-1)) \\ \hat{x}_2(k) &= \hat{x}_2(k-1) + \frac{TC_k}{m_l} \left(1 - \frac{\hat{x}_2(k-1)}{R_{IR}\hat{x}_1(k-1)} \right)\end{aligned}\quad (11)$$

在车辆减速情况下, 左后轮线速度滑模观测器的离散化形式为 :

$$\begin{aligned}
\hat{x}_3(k) &= \hat{x}_3(k-1) - \frac{TR_{IR}C_{Ic}}{J_l} \left(\frac{R_{IR}\hat{x}_3(k-1)}{\hat{x}_4(k-1)} - 1 \right) \\
&\quad + Tl_2(\omega'_{IR}(k-1) - \hat{x}_3(k-1)) + Tk_2 \tanh(\mu\omega'_{IR}(k-1) - \mu\hat{x}_3(k-1)) \quad (12) \\
\hat{x}_4(k) &= \hat{x}_4(k-1) + \frac{TC_{Ic}}{m_l} \left(\frac{R_{IR}\hat{x}_3(k-1)}{\hat{x}_4(k-1)} - 1 \right)
\end{aligned}$$

在式 (11) 和式 (12) 中, k 表示离散化时刻, T 表示离散的周期, ω'_{IR} 表示通过角速度传感器测得的左后轮角速度, $\hat{x}_2(k)$ 表示加速或匀速情况下估计的 k 时刻左后轮线速度, $\hat{x}_4(k)$ 表示减速情况下估计的 k 时刻左后轮线速度。

一种基于滑模观测器的车辆非转向左后轮线速度估计方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于滑模观测器的车辆非转向左后轮线速度估计方法,其目的在于通过所建立的滑模观测器,实现对非转向左后轮线速度的准确、可靠估计,所估计出的非转向左后轮线速度可应用于汽车相关领域,包括车辆的组合定位与导航,汽车主动安全系统等。

背景技术

[0002] 近年来,随着制动防抱死系统 ABS(Anti-lockBrakingSystem)、车身电子稳定系统 ESP(ElectronicStabilityProgram)、车载自动诊断系统 (On-BoardDiagnostics) 在量产车辆上的普及,车辆的轮速可以通过控制器局域网络 (ControllerAreaNetwork) 总线从这些系统中读取。除此之外,轮速数据还可以通过安装在轮毂上的轮速传感器测量,无论是哪种获取方式,都存在着所含噪声较大,精度较低的缺点。非转向轮的轮速信号通常用来估计车辆的纵向车速,若所获取的车辆纵向速度信息准确、可靠,则能够用于车辆组合导航和主动安全等相关领域,提高车辆的行驶安全性和稳定性,这就要求所获取的非转向轮轮速信号准确、可靠,才能保证所估计的车辆纵向车速的准确性。

[0003] 在车辆的组合定位导航方面,基于多传感器融合的车辆组合定位技术是通过车速等车辆运动信息对于车辆位置进行推算,从而在 GPS 失效时获取较为准确的定位信息,纵向速度是其中一个关键的车辆运动信息参数,对其进行准确的测量或估计是推算出准确的定位信息的重要保证。在汽车主动安全系统方面,车辆纵向速度作为制动防抱死系统 ABS(Anti-lock BrakingSystem),驱动防滑系统 ASR(AccelerationSlipRegulation) 和牵引力控制系统 TCS(TractionControlSystem) 等纵向主动安全系统中的一个关键性控制参数,其精度直接影响到它们的控制效果,是车辆主动安全系统的重要参考信息。

[0004] 因此,这些汽车相关领域的应用都要求对车辆纵向速度的实时、精确、低成本的测量或估计,但由于非转向轮轮速信号本身含较大误差,导致所推算出来的车辆纵向速度往往精度较低,难以满足车辆组合定位和主动安全控制的相关领域的应用需求,如何对非转向轮轮速信号进行处理,获取准确的非转向轮轮速信息成为了问题的关键。

[0005] 国外关于轮速信号处理已有较成熟的方法,但是在国外产品中通常将轮速处理的软硬件制成专用芯片加以保护,对于其原理和实现方法,国内知之甚少。国内处理轮速的信号方法大多存在可靠性差,轮速识别的阈值值过高的缺点,所获取的非转向轮信息存在着精度较低的不足,从而导致根据非转向轮信息估计出的纵向车速信息精度不高,针对于此,结合车辆相关领域的需求,本发明将以左后轮为例,提供一种基于滑模观测器的高精度、低成本、实时性强的车辆非转向轮轮速估计方法。

发明内容

[0006] 本发明提出了一种基于滑模观测器的车辆非转向左后轮线速度估计方法,适用于汽车相关领域中对前轮转向车辆的非转向左后轮线速度估计,具有高精度、低成本、实时性

强的特点。

[0007] 本发明为实现上述目的,采用如下的技术方案:

[0008] 本发明提出了一种基于滑模观测器的车辆非转向左后轮线速度估计方法,适用于汽车相关领域中对前轮转向车辆的非转向左后轮线速度估计,其特征在于包含如下步骤:

[0009] 1) 建立非转向左后轮线速度滑模观测器

[0010] 当车辆加速或匀速运行时,对于左后轮,采用车轮动力学模型,该模型的状态空间方程为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, x_2) + \frac{T_{lR}}{J_l} \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2) \end{aligned} \quad (1)$$

[0012] 式(1)中 x_1 和 x_2 是滑模观测器的状态量,并且 $x_1 = \omega_{lR}$, $x_2 = v_{x_{lR}}$, ω_{lR} 表示左后轮的角速度, $v_{x_{lR}}$ 表示左后轮的线速度, T_{lR} 为左后轮的扭矩, J_l 为左后轮转动惯量,

$$f_1(x_1, x_2) = -\frac{R_{lR} C_{lx}}{J_l} \left(1 - \frac{x_2}{R_{lR} x_1}\right), f_2(x_1, x_2) = \frac{C_{lx}}{m_l} \left(1 - \frac{x_2}{R_{lR} x_1}\right).$$

在 $f_1(x_1, x_2)$ 和 $f_2(x_1, x_2)$ 的表达式中, R_{lR} 为左后轮的有效半径, C_{lx} 为左后轮的纵向轮胎刚度, m_l 为左后轮 1/4 车辆模型的等效质量;

[0013] 左后轮角速度 x_1 可以通过角速度传感器测得,而左后轮线速度 x_2 无法直接测得,需要通过滑模观测器进行估计;

[0014] 对式(1)所示车轮动力学模型,建立如下的滑模观测器模型:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= f_1(\hat{x}_1, \hat{x}_2) + l_1 s_1 + k_1 \operatorname{sgn}(s_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 &= f_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2) + \tau_1 \operatorname{sgn}(s_1) \end{aligned} \quad (2)$$

[0016] 式(2)中, $\hat{x}_1$ 和 $\hat{x}_2$ 分别表示 x_1 和 x_2 的估计值, l_1 是滑模面之外的误差收敛增益, k_1 和 τ_1 则表示滑模面上的误差收敛增益, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 表示 sign 函数,滑动函数 s_1 定义为可测量状态 x_1 和观测器估计值 $\hat{x}_1$ 之间的差值,即:

$$s_1 = x_1 - \hat{x}_1 \quad (3)$$

[0018] 当车辆减速运行时,对于左后轮,采用车轮动力学模型,该模型的状态空间方程为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 &= f_3(x_3, x_4) + \frac{T_{lR}}{J_l} \\ \dot{x}_4 &= f_4(x_3, x_4) \end{aligned} \quad (4)$$

[0020] 式(4)中 x_3 和 x_4 是滑模观测器的状态量,并且 $x_3 = \omega_{lR}$, $x_4 = v_{x_{lR}}$,

$$f_3(x_3, x_4) = -\frac{R_{lR} C_{lx}}{J_l} \left(\frac{R_{lR} x_3}{x_4} - 1\right), f_4(x_3, x_4) = \frac{C_{lx}}{m_l} \left(\frac{R_{lR} x_3}{x_4} - 1\right);$$

[0021] 左后轮角速度 x_3 可以通过角速度传感器测得,而左后轮线速度 x_4 无法直接测得,

需要通过滑模观测器进行估计；

[0022] 对式(4)所示车轮动力学模型,建立如下的滑模观测器模型：

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_3 &= f_3(\hat{x}_3, \hat{x}_4) + l_2 s_2 + k_2 \operatorname{sgn}(s_2) \\ \dot{\hat{x}}_4 &= f_4(\hat{x}_3, \hat{x}_4) + \tau_2 \operatorname{sgn}(s_2) \end{aligned} \quad (5)$$

[0024] 式(5)中, $\hat{x}_3$ 和 $\hat{x}_4$ 分别表示 x_3 和 x_4 的估计值, l_2 是滑模面之外的误差收敛增益, k_2 和 τ_2 则表示滑模面上的误差收敛增益, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 表示 sign 函数,滑动函数 s_2 定义为可测量状态 x_3 和观测器估计值 $\hat{x}_3$ 之间的差值,即：

$$s_2 = x_3 - \hat{x}_3 \quad (6)$$

[0026] 为了避免符号函数引起过度的震荡,在实际估计过程中,上述式(2)和式(5)中出现的 $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 函数用下面的 $\operatorname{sgn}_{\text{eq}}(\cdot)$ 函数取代,

$$\operatorname{sgn}_{\text{eq}}(s_1) = \tanh(\mu s_1)$$

$$\operatorname{sgn}_{\text{eq}}(s_2) = \tanh(\mu s_2) \quad (7)$$

[0029] 其中 $\tanh(\cdot)$ 是双曲正切函数, μ 是一个用来调整双曲正切函数倾斜度的设计参数；

[0030] 2) 确定滑模观测器的各个增益

[0031] 对于式(2)和式(5)所表示的滑模观测器,增益 l_1 、 k_1 、 τ_1 、 l_2 、 k_2 和 τ_2 由下面的式子确定

$$l_1 > \frac{\partial f_1}{\partial x_1}, \quad k_1 > \left| \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \tilde{x}_2 \right| + \left| \frac{T_{IR}}{J_l} \right| + \eta_1 \quad (8)$$

$$l_2 > \frac{\partial f_3}{\partial x_3}, \quad k_2 > \left| \frac{\partial f_3}{\partial x_4} \tilde{x}_4 \right| + \left| \frac{T_{IR}}{J_l} \right| + \eta_2 \quad (9)$$

$$\tau_1 = \tau_2 = 0 \quad (10)$$

[0035] 式(8)和式(9)中, $\frac{\partial f_1}{\partial x_1}$ 表示 $f_1(x_1, x_2)$ 对 x_1 求偏导数, $\frac{\partial f_1}{\partial x_2}$ 表示 $f_1(x_1, x_2)$ 对 x_2 求偏导数, $\frac{\partial f_3}{\partial x_3}$ 表示 $f_3(x_3, x_4)$ 对 x_3 求偏导数, $\frac{\partial f_3}{\partial x_4}$ 表示 $f_3(x_3, x_4)$ 对 x_4 求偏导数, $\tilde{x}_2 = x_2 - \hat{x}_2$,

$\tilde{x}_4 = x_4 - \hat{x}_4$, η_1 和 η_2 为任意给定的正数；

[0036] 3) 进行离散化的估计递推

[0037] 在实际的估计过程中,需要采用离散化的估计递推形式,为此将加速或匀速情况下左后轮线速度滑模观测器式(2)和减速情况下左后轮线速度滑模观测器式(5)进行离散化处理；

[0038] 在车辆加速或匀速情况下,左后轮线速度滑模观测器式(2)的离散化形式为：

$$\begin{aligned}
\hat{x}_1(k) &= \hat{x}_1(k-1) - \frac{TR_{IR}C_{Ix}}{J_I} \left(1 - \frac{\hat{x}_2(k-1)}{R_{IR}\hat{x}_1(k-1)}\right) \\
&+ Tl_1(\omega'_{IR}(k-1) - \hat{x}_1(k-1)) + Tk_1 \tanh(\mu\omega'_{IR}(k-1) - \mu\hat{x}_1(k-1)) \quad (11) \\
\hat{x}_2(k) &= \hat{x}_2(k-1) + \frac{TC_{Ix}}{m_I} \left(1 - \frac{\hat{x}_2(k-1)}{R_{IR}\hat{x}_1(k-1)}\right)
\end{aligned}$$

[0040] 在车辆减速情况下,左后轮线速度滑模观测器式(5)的离散化形式为:

$$\begin{aligned}
\hat{x}_3(k) &= \hat{x}_3(k-1) - \frac{TR_{IR}C_{Ix}}{J_I} \left(\frac{R_{IR}\hat{x}_3(k-1)}{\hat{x}_4(k-1)} - 1\right) \\
&+ Tl_2(\omega'_{IR}(k-1) - \hat{x}_3(k-1)) + Tk_2 \tanh(\mu\omega'_{IR}(k-1) - \mu\hat{x}_3(k-1)) \quad (12) \\
\hat{x}_4(k) &= \hat{x}_4(k-1) + \frac{TC_{Ix}}{m_I} \left(\frac{R_{IR}\hat{x}_3(k-1)}{\hat{x}_4(k-1)} - 1\right)
\end{aligned}$$

[0042] 在式(11)和式(12)中, k 表示离散化时刻, T 表示离散的周期, ω'_{IR} 表示通过角速度传感器测得的左后轮角速度, $\hat{x}_2(k)$ 表示加速或匀速情况下估计的 k 时刻左后轮线速度, $\hat{x}_4(k)$ 表示减速情况下估计的 k 时刻左后轮线速度。

[0043] 有益效果

[0044] 1 本发明提出了一种基于滑模观测器的车辆非转向左后轮线速度估计方法,适用于汽车相关领域,如车辆组合定位、导航控制和汽车主动安全的相关控制,满足它们对准确可靠非转向左后轮线速度的需求;

[0045] 2 本发明提出的方法具有抗干扰能力强、精度高、成本低以及实时性强的特点。

附图说明

[0046] 图 1 是本发明所提出方法流程框图;

[0047] 图 2 是车辆三自由度平面复合运动模型;

[0048] 图 3 是左后轮车轮动力学模型;

[0049] 图 4 是直测法推算的非转向左后轮线速度、本发明方法推算的非转向左后轮线速度和 Carsim 输出的非转向左后轮线速度参考值对比图;

[0050] 图 5 是图 4 的局部放大图;

[0051] 图 6 是图 4 的局部放大图。

具体实施方式

[0052] 实施实例 1

[0053] 近年来,随着制动防抱死系统 ABS(Anti-lockBrakingSystem)、车身电子稳定系统 ESP(ElectronicStabilityProgram)、车载自动诊断系统 (On-BoardDiagnostics) 在量产车辆上的普及,车辆的轮速可以通过控制器局域网络 (ControllerAreaNetwork) 总线从这些系统中读取。除此之外,轮速数据还可以通过安装在轮毂上的轮速传感器测量,无论是哪种获取方式,由于受到震动、温度等外界条件影响,传感器测量的原始数据势必含有较多的噪声,存在着所含噪声较大,精度较低的缺点,因此,对轮速信号进行处理,获取较为准确、可靠的轮速信息成为国内外关注的热点。

[0054] 通过非转向轮的轮速信号来估计纵向车速时最为常用的车速估计方法,若所获取的车辆纵向速度信息准确、可靠,则能够用于车辆组合导航和主动安全等相关领域,提高车辆的行驶安全性和稳定性,这就要求所获取的非转向轮轮速信号准确、可靠,才能保证所估计的车辆纵向车速的准确性。

[0055] 在车辆的组合定位导航方面,基于多传感器融合的车辆组合定位技术是通过车速等车辆运动信息对于车辆位置进行推算,从而在 GPS 失效时获取较为准确的定位信息,纵向速度是其中一个关键的车辆运动信息参数,对其进行准确的测量或估计是推算出准确的定位信息的重要保证。在汽车主动安全系统方面,车辆纵向速度作为制动防抱死系统 ABS(Anti-lock Braking System),驱动防滑系统 ASR(Acceleration Slip Regulation) 和牵引力控制系统 TCS(Traction Control System) 等纵向主动安全系统中的一个关键性控制参数,其精度直接影响到它们的控制效果,是车辆主动安全系统的重要参考信息。

[0056] 因此,对车辆纵向速度的实时、精确、低成本的测量或估计能够有效提高车辆组合定位与导航的精度,并为汽车主动安全系统提供准确、可靠的重要参考信息,提高车辆的行驶安全性和稳定性,满足汽车相关领域的需求,具有重要的现实意义。但由于非转向轮轮速信号本身含较大误差,导致所推算出来的车辆纵向速度往往精度较低,难以满足车辆组合定位和主动安全控制的相关领域的应用需求。如何对非转向轮轮速信号进行处理,获取准确的非转向轮轮速信息成为了问题的关键。

[0057] 国外关于轮速信号处理已有较成熟的方法,但是在国外产品中通常将轮速处理的软硬件制成专用芯片加以保护,对于其原理和实现方法,国内知之甚少。国内处理轮速的信号方法大多存在可靠性差,轮速识别的门槛值过高的缺点。所获取的非转向轮信息存在着精度较低的不足,从而导致根据非转向轮信息估计出的纵向车速信息精度不高,针对于此,结合车辆相关领域的需求,本发明将以左后轮为例,提出一种基于滑模观测器的高精度、低成本、实时性强的车辆非转向轮轮速估计方法。

[0058] 为了实现复杂工况下车辆非转向左后轮线速度的准确、可靠估计,本发明提出了一种基于滑模观测器的车辆非转向左后轮线速度估计方法,具有高精度、低成本、实时性强的特点。

[0059] 本发明的具体思路如下:

[0060] 本发明针对目前应用较多的前轮转向四轮汽车,采用附图 2 所示的平面复合运动模型。该模型有三个自由度,分别是纵向运动、侧向运动和横摆运动,并且左后轮和右后轮为非转向轮。其中 o 点为模型质心, a 为质心到前轮轴的距离, b 为质心到后轮轴的距离, v 是对地绝对平面速度, β 为侧滑角, ω 为横摆角速度, T_w 为后轴左右轮的轮距, v_x 表示整车纵向速度。 $v_{x_{lR}}$ 和 $v_{x_{rR}}$ 分别代表左后轮和右后轮的线速度,其中第一个下脚标 l 和 r 分别表示左轮和右轮,第二个下脚标 R 表示后轮。根据运动关系可得:

$$[0061] \quad v_{x_{lR}} = v_x - \frac{T_w}{2} \omega \quad (1)$$

$$[0062] \quad v_{x_{rR}} = v_x + \frac{T_w}{2} \omega \quad (2)$$

[0063] 整理式(1)和式(2)可以得到

$$[0064] \quad v_x = \frac{v_{x_{lR}} + v_{x_{rR}}}{2} \quad (3)$$

[0065] 根据式(3)可以看出,车辆纵向速度可以通过左后轮和右后轮的线速度推算出来,并且左后轮和右后轮线速度的精度直接影响到车辆纵向速度的估计精度,因此非转向轮线速度的准确、可靠估计对于整车纵向速度的估计具有重要的意义。由于左后轮和右后轮的情形类似,本发明中仅以左后轮为例进行阐述。

[0066] 为了提高非转向左后轮线速度的估计精度,对左后轮建立如图3所示的车轮动力学模型。其中 T_{lR} 为左后轮的扭矩, ω_{lR} 为左后轮的角速度, R_{lR} 为左后轮的有效半径, $F_{x_{lR}}$ 为左后轮轮胎-地面摩擦力。轮胎-地面摩擦力产生于轮胎和地面的接触面,其方向和轮胎-地面的相对运动方向相反。

[0067] 基于图3所示的左后轮车轮动力学模型,根据牛顿第二定律,左后轮的动力学模型可以描述为:

$$[0068] \quad \begin{aligned} J_l \dot{\omega}_{lR} &= T_{lR} - R_{lR} F_{x_{lR}} \\ m_l \dot{v}_{x_{lR}} &= F_{x_{lR}} \end{aligned} \quad (4)$$

[0069] 其中 J_l 为左后轮的转动惯量, ω_{lR} 为左后轮的角速度, T_{lR} 为左后轮的扭矩, R_{lR} 为左后轮的有效半径, $F_{x_{lR}}$ 为左后轮轮胎-地面摩擦力, m_l 为左后轮 1/4 车辆模型的等效质量, $v_{x_{lR}}$ 表示左后轮的线速度。

[0070] 为了计算左后轮轮胎-地面摩擦力 $F_{x_{lR}}$,引入了纵向滑移率。纵向滑移率是由于接地胎面单元的弯曲变形产生的,其与车辆的加减速状况密切相关。对左后轮其纵向滑移率 δ_l 可表示为:

$$[0071] \quad \delta_l = h_\tau(\omega_{lR}, v_{x_{lR}}) = \begin{cases} 1 - \frac{v_{x_{lR}}}{R_{lR} \omega_{lR}} & \text{当加速或匀速运行时 } (v_{x_{lR}} \leq R_{lR} \omega_{lR}) \\ \frac{R_{lR} \omega_{lR}}{v_{x_{lR}}} - 1 & \text{当减速运行时 } (v_{x_{lR}} > R_{lR} \omega_{lR}) \end{cases} \quad (5)$$

[0072] 在车辆正常驾驶的情况下,纵向滑移率较小($\leq 5\%$),这时左后轮-地面摩擦力 $F_{x_{lR}}$ 和纵向滑移率 δ_l 近似成正比,具体关系可描述为:

$$[0073] \quad F_{x_{lR}} = C_{lx} \delta_l \quad (6)$$

[0074] 其中 C_{lx} 为左后轮的纵向轮胎刚度。

[0075] 此时,将式(5)和式(6)代入式(4)可得:

$$[0076] \quad \begin{aligned} \dot{\omega}_{lR} &= \frac{T_{lR}}{J_l} - \frac{R_{lR} C_{lx}}{J_l} h_\tau(\omega_{lR}, v_{x_{lR}}) \\ \dot{v}_{x_{lR}} &= \frac{C_{lx}}{m_l} h_\tau(\omega_{lR}, v_{x_{lR}}) \end{aligned} \quad (7)$$

[0077] 建立了式(7)所示的动力学模型后,接下来讨论如何设计滑模观测器。

[0078] 作为变结构控制的一种,滑模观测器的计算量较小,设计过程和物理实现简单,可以通过强制系统状态进入滑动模态的方式来重构系统状态。另外,滑模观测器的鲁棒性较强,能够克服模型偏差及参数不确定性带来的影响,同时对外部干扰的抑制能力较强。由于汽车行驶过程中行车环境变化迅速,加之道路情况复杂多变,同时受温度等不确定因素的影响,测得的轮胎角速度含有较多的噪声。为实现非转向左后轮线速度的准确、可靠估计,本发明将对式(7)的非线性车轮动力学模型建立合适的滑模观测器。根据左后轮纵向滑移率表达式的不同,下面按照车辆的加减速情况来分别阐述滑模观测器的具体设计过程。

[0079] 当车辆加速或匀速运行时,定义状态变量 $x_1 = \omega_{lR}$, $x_2 = v_{x_{lR}}$, 则可将式(7)用状态空间方程描述为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, x_2) + \frac{T_{lR}}{J_l} \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2) \end{aligned} \quad (8)$$

$$[0081] \quad \text{其中 } f_1(x_1, x_2) = -\frac{R_{lR} C_{lR}}{J_l} \left(1 - \frac{x_2}{R_{lR} x_1}\right), \quad f_2(x_1, x_2) = \frac{C_{lR}}{m_l} \left(1 - \frac{x_2}{R_{lR} x_1}\right)。$$

[0082] 在式(8)中,左后轮角速度 x_1 可以通过角速度传感器测得,而左后轮线速度 x_2 无法直接测得,需要通过滑模观测器进行估计。本发明所讨论的滑模观测器,一方面可以提高直测量的精度,另一方面可以扩充状态的估计维数,实现对非直测量的虚拟观测,便于控制目标的实现。

[0083] 对于式(8)所示的车轮动力学模型,与 T_{lR} 有关的项可看作干扰或未知输入,于是提出并建立如下的滑模观测器模型:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= f_1(\hat{x}_1, \hat{x}_2) + l_1 s_1 + k_1 \operatorname{sgn}(s_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 &= f_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2) + \tau_1 \operatorname{sgn}(s_1) \end{aligned} \quad (9)$$

[0085] 式(9)中, $\hat{x}_1$ 和 $\hat{x}_2$ 分别表示 x_1 和 x_2 的估计值。 l_1 是滑模面之外的误差收敛增益, k_1 和 τ_1 则表示滑模面上的误差收敛增益, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 表示 sign 函数(即符号函数)。滑动函数 s_1 定义为可测量状态 x_1 和观测器估计值 $\hat{x}_1$ 之间的差值,即:

$$[0086] \quad s_1 = x_1 - \hat{x}_1 \quad (10)$$

[0087] 将式(8)减去式(9),可得滑模观测器系统状态的误差动力学方程:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_1 &= \Delta f_1 - l_1 s_1 - k_1 \operatorname{sgn}(s_1) + \frac{T_{lR}}{J_l} \\ \dot{\tilde{x}}_2 &= \Delta f_2 - \tau_1 \operatorname{sgn}(s_1) \end{aligned} \quad (11)$$

[0089] 式(11)中, $\tilde{x}_1 = x_1 - \hat{x}_1 = s_1$, $\tilde{x}_2 = x_2 - \hat{x}_2$, $\Delta f_1 \equiv f_1(x_1, x_2) - f_1(\hat{x}_1, \hat{x}_2)$, $\Delta f_2 \equiv f_2(x_1, x_2) - f_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2)$ 。

[0090] 滑模观测器设计的关键是如何根据稳定性原理确定式(11)中滑模观测器的各个增益。为此,构造如下的李雅普诺夫(Lyapunov)函数:

[0091]
$$V(s_1) = \frac{1}{2}s_1^2 \quad (12)$$

[0092] 为了保证滑模状态,应满足条件 $s_1\dot{s}_1 < 0$, 即:

[0093]
$$s_1\dot{s}_1 < -\eta_1|s_1| \quad \forall \eta_1 > 0 \quad (13)$$

[0094] 其中 η_1 为任意给定的正数。

[0095] 为了确定增益 l_1 和 k_1 , 对式(11) 第一个方程中的连续可微函数 Δf_1 进行泰勒级数展开:

[0096]
$$\begin{aligned} \Delta f_1 &= f_1(x_1, x_2) - f_1(\hat{x}_1, \hat{x}_2) \\ &= \frac{\partial f_1}{\partial x_1}s_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2}\tilde{x}_2 + \nabla_1 \\ &\approx \frac{\partial f_1}{\partial x_1}s_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2}\tilde{x}_2 \end{aligned} \quad (14)$$

[0097] 式(14)中, ∇_1 表示由微分引起的高阶微量(可以忽略不计)。将式(11)的第一个方程和式(14)代入式(13), 可得:

[0098]
$$s_1\left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}s_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2}\tilde{x}_2 + \frac{T_{IR}}{J_l} - l_1s_1 - k_1\text{sgn}(s_1)\right) < -\eta_1|s_1| \quad (15)$$

[0099] 整理不等式(15) 可得:

[0100]
$$\left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1} - l_1\right)s_1^2 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2}s_1\tilde{x}_2 + \frac{T_{IR}}{J_l}s_1 - k_1|s_1| < -\eta_1|s_1| \quad (16)$$

[0101] 从式(16) 可以清楚的看出, 只要下面两个条件同时满足,

[0102]
$$\frac{\partial f_1}{\partial x_1} - l_1 < 0, \quad |s_1|\left(\left|\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\tilde{x}_2\right| + \left|\frac{T_{IR}}{J_l}\right| - k_1\right) < -\eta_1|s_1| \quad (17)$$

[0103] 滑模状态就可以得到保证。此时, 就可根据下面的不等式确定增益 l_1 和 k_1 ,

[0104]
$$l_1 > \frac{\partial f_1}{\partial x_1}, \quad k_1 > \left|\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\tilde{x}_2\right| + \left|\frac{T_{IR}}{J_l}\right| + \eta_1 \quad (18)$$

[0105] 从式(18) 可知, k_1 要足够大, 保证超过 $\left|\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\tilde{x}_2\right|$, $\left|\frac{T_{IR}}{J_l}\right|$ 和 η_1 三者之和。

[0106] 当滑模状态达到时, 有 $s_1 = \dot{s}_1 = 0$, 将其代入式(11) 的第一个方程得:

[0107]
$$\dot{s}_1 = \frac{\partial f_1}{\partial x_1}s_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2}\tilde{x}_2 - l_1s_1 - k_1\text{sgn}(s_1) + \frac{T_{IR}}{J_l} \quad (19)$$

[0108] 经化简可以得到:

[0109]
$$\text{sgn}(s_1) = \frac{1}{k_1}\left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\tilde{x}_2 + \frac{T_{IR}}{J_l}\right) \quad (20)$$

[0110] 当达到滑模状态时, 将式(20) 代入式(11) 的第二个方程, 同时考虑到

$\Delta f_2 \approx \frac{\partial f_2}{\partial x_1} s_1 + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \tilde{x}_2$, 可得到:

$$\begin{aligned}
 \dot{\tilde{x}}_2 &\approx \frac{\partial f_2}{\partial x_1} s_1 + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \tilde{x}_2 - \tau_1 \operatorname{sgn}(s_1) \\
 &= \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \tilde{x}_2 - \tau_1 \operatorname{sgn}(s_1) \\
 [0111] \quad &= \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \tilde{x}_2 - \frac{\tau_1}{k_1} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2} \tilde{x}_2 + \frac{T_{IR}}{J_l} \right) \\
 &= \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2} - \frac{\tau_1}{k_1} \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right) \tilde{x}_2 - \frac{\tau_1 T_{IR}}{k_1 J_l}
 \end{aligned} \tag{21}$$

[0112] 由于 $\frac{\partial f_2}{\partial x_2} = -\frac{C_{lx}}{m_l R_{IR} x_1} < 0$, 为了保证估计过程的收敛稳定, 一个简单可行的方法是令 $\tau_1 = 0$, 进而, 式(21)可以简化为:

$$[0113] \quad \dot{\tilde{x}}_2 = -\frac{C_{lx}}{m_l R_{IR} x_1} \tilde{x}_2 \tag{22}$$

[0114] 至此, 在车辆加速或匀速情况下, 左后轮线速度滑模观测器式(9)中所有增益的确定方法已讨论完毕。

[0115] 车辆加速或匀速情况下左后轮线速度滑模观测器设计好之后, 下面接着讨论减速情况下左后轮线速度滑模观测器的具体设计。

[0116] 当车辆减速运行时, 定义状态变量 $x_3 = \omega_{IR}$, $x_4 = v_{xIR}$, 则可将式(7)用状态空间方程描述为:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_3 &= f_3(x_3, x_4) + \frac{T_{IR}}{J_l} \\
 \dot{x}_4 &= f_4(x_3, x_4)
 \end{aligned} \tag{23}$$

$$[0118] \quad \text{其中 } f_3(x_3, x_4) = -\frac{R_{IR} C_{lx}}{J_l} \left(\frac{R_{IR} x_3}{x_4} - 1 \right), \quad f_4(x_3, x_4) = \frac{C_{lx}}{m_l} \left(\frac{R_{IR} x_3}{x_4} - 1 \right)。$$

[0119] 在式(23)中, 左后轮角速度 x_3 可以通过角速度传感器测得, 而左后轮线速度 x_4 无法直接测得, 需要通过滑模观测器进行估计。对于式(23)所示的车轮动力学模型, 与 T_{IR} 有关的项可看作干扰或未知输入, 于是提出并建立如下的滑模观测器模型:

$$\begin{aligned}
 \dot{\hat{x}}_3 &= f_3(\hat{x}_3, \hat{x}_4) + l_2 s_2 + k_2 \operatorname{sgn}(s_2) \\
 \dot{\hat{x}}_4 &= f_4(\hat{x}_3, \hat{x}_4) + \tau_2 \operatorname{sgn}(s_2)
 \end{aligned} \tag{24}$$

[0121] 式(24)中, $\hat{x}_3$ 和 $\hat{x}_4$ 分别表示 x_3 和 x_4 的估计值。 l_2 是滑模面之外的误差收敛增益, k_2 和 τ_2 则表示滑模面上的误差收敛增益, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 表示 sign 函数(即符号函数)。滑动函数 s_2 定义为可测量状态 x_3 和观测器估计值 $\hat{x}_3$ 之间的差值, 即:

$$[0122] \quad s_2 = x_3 - \hat{x}_3 \tag{25}$$

[0123] 将式(23)减去式(24),可得滑模观测器系统状态的误差动力学方程:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_3 &= \Delta f_3 - l_2 s_2 - k_2 \operatorname{sgn}(s_2) + \frac{T_{IR}}{J_l} \\ \dot{\tilde{x}}_4 &= \Delta f_4 - \tau_2 \operatorname{sgn}(s_2) \end{aligned} \quad (26)$$

[0125] 式(26)中, $\tilde{x}_3 = x_3 - \hat{x}_3 = s_2$, $\tilde{x}_4 = x_4 - \hat{x}_4$, $\Delta f_3 \equiv f_3(x_3, x_4) - f_3(\hat{x}_3, \hat{x}_4)$, $\Delta f_4 \equiv f_4(x_3, x_4) - f_4(\hat{x}_3, \hat{x}_4)$ 。

[0126] 为了确定式(26)中滑模观测器的各个增益,构造如下的李雅普诺夫(Lyapunov)函数:

$$V(s_2) = \frac{1}{2} s_2^2 \quad (27)$$

[0128] 为了保证滑模状态,应满足条件 $s_2 \dot{s}_2 < 0$, 即:

$$s_2 \dot{s}_2 < -\eta_2 |s_2| \quad \forall \quad \eta_2 > 0 \quad (28)$$

[0130] 其中 η_2 为任意给定的正数。

[0131] 为了确定增益 l_2 和 k_2 , 对(26)式第一个方程中的连续可微函数 Δf_3 进行泰勒级数展开:

$$\begin{aligned} \Delta f_3 &= f_3(x_3, x_4) - f_3(\hat{x}_3, \hat{x}_4) \\ &= \frac{\partial f_3}{\partial x_3} s_2 + \frac{\partial f_3}{\partial x_4} \tilde{x}_4 + \nabla_2 \\ &\approx \frac{\partial f_3}{\partial x_3} s_2 + \frac{\partial f_3}{\partial x_4} \tilde{x}_4 \end{aligned} \quad (29)$$

[0133] 式(29)中, ∇_2 表示由微分引起的高阶微量(可以忽略不计)。将式(26)的第一个方程和式(29)代入式(28),可得:

$$s_2 \left(\frac{\partial f_3}{\partial x_3} s_2 + \frac{\partial f_3}{\partial x_4} \tilde{x}_4 + \frac{T_{IR}}{J_l} - l_2 s_2 - k_2 \operatorname{sgn}(s_2) \right) < -\eta_2 |s_2| \quad (30)$$

[0135] 整理不等式(30)可得:

$$\left(\frac{\partial f_3}{\partial x_3} - l_2 \right) s_2^2 + \frac{\partial f_3}{\partial x_4} s_2 \tilde{x}_4 + \frac{T_{IR}}{J_l} s_2 - k_2 |s_2| < -\eta_2 |s_2| \quad (31)$$

[0137] 从式(31)可以清楚的看出,只要下面两个条件同时满足,

$$\frac{\partial f_3}{\partial x_3} - l_2 < 0, \quad |s_2| \left(\left| \frac{\partial f_3}{\partial x_4} \tilde{x}_4 \right| + \left| \frac{T_{IR}}{J_l} \right| - k_2 \right) < -\eta_2 |s_2| \quad (32)$$

[0139] 滑模状态就可以得到保证。此时,就可根据下面的不等式确定增益 l_2 和 k_2 ,

$$l_2 > \frac{\partial f_3}{\partial x_3}, \quad k_2 > \left| \frac{\partial f_3}{\partial x_4} \tilde{x}_4 \right| + \left| \frac{T_{IR}}{J_l} \right| + \eta_2 \quad (33)$$

[0141] 从式(33)可知, k_2 要足够大, 保证超过 $\left| \frac{\partial f_3}{\partial x_4} \tilde{x}_4 \right|$, $\left| \frac{T_{lr}}{J_l} \right|$ 和 η_2 三者之和。

[0142] 当滑模状态达到时, 有 $s_2 = \dot{s}_2 = 0$, 将其代入式(26)的第一个方程得:

$$[0143] \quad \dot{s}_2 = \frac{\partial f_3}{\partial x_3} s_2 + \frac{\partial f_3}{\partial x_4} \tilde{x}_4 - l_2 s_2 - k_2 \operatorname{sgn}(s_2) + \frac{T_{lr}}{J_l} \quad (34)$$

[0144] 经化简可以得到:

$$[0145] \quad \operatorname{sgn}(s_2) = \frac{1}{k_2} \left(\frac{\partial f_3}{\partial x_4} \tilde{x}_4 + \frac{T_{lr}}{J_l} \right) \quad (35)$$

[0146] 当达到滑模状态时, 将式(35)代入式(26)的第二个方程, 同时考虑到

$\Delta f_4 \approx \frac{\partial f_4}{\partial x_3} s_2 + \frac{\partial f_4}{\partial x_4} \tilde{x}_4$, 可得到:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_4 &\approx \frac{\partial f_4}{\partial x_3} s_2 + \frac{\partial f_4}{\partial x_4} \tilde{x}_4 - \tau_2 \operatorname{sgn}(s_2) \\ &= \frac{\partial f_4}{\partial x_4} \tilde{x}_4 - \tau_2 \operatorname{sgn}(s_2) \\ [0147] \quad &= \frac{\partial f_4}{\partial x_4} \tilde{x}_4 - \frac{\tau_2}{k_2} \left(\frac{\partial f_3}{\partial x_4} \tilde{x}_4 + \frac{T_{lr}}{J_l} \right) \\ &= \left(\frac{\partial f_4}{\partial x_4} - \frac{\tau_2}{k_2} \frac{\partial f_3}{\partial x_4} \right) \tilde{x}_4 - \frac{\tau_2 T_{lr}}{k_2 J_l} \end{aligned} \quad (36)$$

[0148] 由于 $\frac{\partial f_4}{\partial x_4} = -\frac{C_{lx} R_{lr} x_3}{m_l x_4^2} < 0$, 为了保证估计过程的收敛稳定, 一个简单可行的方法是令 $\tau_2 = 0$, 进而, 式(36)可以简化为:

$$[0149] \quad \dot{\tilde{x}}_4 = -\frac{C_{lx} R_{lr} x_3}{m_l x_4^2} \tilde{x}_4 \quad (37)$$

[0150] 至此, 在车辆减速情况下, 左后轮线速度滑模观测器式(24)中所有增益的确定方法已讨论完毕。

[0151] 另外, 为了避免符号函数引起过度的震荡, 在实际估计过程中, 上述各式中出现的 $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 函数用下面的 $\operatorname{sgn}_{eq}(\cdot)$ 函数取代,

$$[0152] \quad \operatorname{sgn}_{eq}(s_1) = \tanh(\mu s_1)$$

$$[0153] \quad \operatorname{sgn}_{eq}(s_2) = \tanh(\mu s_2) \quad (38)$$

[0154] 其中 $\tanh(\cdot)$ 是双曲正切函数, μ 是一个用来调整双曲正切函数倾斜度的设计参数。

[0155] 在实际的估计过程中, 需要采用离散化的估计递推形式, 为此将左后轮线速度滑模观测器式(9)和式(24)进行离散化处理, 具体离散化形式如下:

[0156] 当车辆加速或匀速时, 左后轮线速度滑模观测器式(9)的离散化形式为:

$$\begin{aligned}
\hat{x}_1(k) &= \hat{x}_1(k-1) - \frac{TR_{IR}C_{Iv}}{J_l} \left(1 - \frac{\hat{x}_2(k-1)}{R_{IR}\hat{x}_1(k-1)}\right) \\
&+ Tl_1(\omega'_{IR}(k-1) - \hat{x}_1(k-1)) + Tk_1 \tanh(\mu\omega'_{IR}(k-1) - \mu\hat{x}_1(k-1)) \\
\hat{x}_2(k) &= \hat{x}_2(k-1) + \frac{TC_{Iv}}{m_l} \left(1 - \frac{\hat{x}_2(k-1)}{R_{IR}\hat{x}_1(k-1)}\right)
\end{aligned} \quad (39)$$

[0158] 当车辆减速时,左后轮线速度滑模观测器式(24)的离散化形式为:

$$\begin{aligned}
\hat{x}_3(k) &= \hat{x}_3(k-1) - \frac{TR_{IR}C_{Iv}}{J_l} \left(\frac{R_{IR}\hat{x}_3(k-1)}{\hat{x}_4(k-1)} - 1\right) \\
&+ Tl_2(\omega'_{IR}(k-1) - \hat{x}_3(k-1)) + Tk_2 \tanh(\mu\omega'_{IR}(k-1) - \mu\hat{x}_3(k-1)) \\
\hat{x}_4(k) &= \hat{x}_4(k-1) + \frac{TC_{Iv}}{m_l} \left(\frac{R_{IR}\hat{x}_3(k-1)}{\hat{x}_4(k-1)} - 1\right)
\end{aligned} \quad (40)$$

[0160] 在式(39)和式(40)中, k 表示离散化时刻, T 表示离散的周期, ω'_{IR} 表示通过角速度传感器测得的左后轮角速度, $\hat{x}_2(k)$ 表示加速或匀速情况下估计的 k 时刻左后轮线速度, $\hat{x}_4(k)$ 表示减速情况下估计的 k 时刻左后轮线速度。

[0161] 实施实例 2

[0162] 为验证本发明提出的基于滑模观测器的车辆非转向轮线速度估计方法的实际效果,在 Matlab/Simulink 环境下利用专业的汽车动力学软件 Carsim 进行了仿真实验。

[0163] Carsim 是由美国 MSC (MechanicalSimulationCorporation) 公司开发的汽车动力学仿真软件,其内部的车辆动力学模型是通过分别对汽车的车体、悬架、转向和制动等子系统以及各轮胎的高逼真建模来实现的,具有很高的自由度,能够提供非常接近实际的准确的车辆运行状态信息,因此,Carsim 输出的车辆运行状态可作为车辆的参考输出。目前,Carsim 被国际上众多的汽车制造商、零部件供应商所采用,已成为汽车行业的标准软件,享有很高的声誉。

[0164] 为检验本发明提出的算法在车辆典型行驶工况下的估计效果,在仿真试验中设置了典型工况。此工况的路径为由直线和圆弧构成的环形路,环形路径两端半圆的半径为 50 米,中间的直线部分长 500 米;实验过程中,汽车纵向速度从 36 千米/小时到 72 千米/小时不停的做加速、减速和匀速变化。此工况的路径既有直线也有弯道,并且车辆速度不停的变化,属于典型道路行驶工况,很具有代表性。所用车辆是一个前轮转向小型客车,主要参数如下:质量 $m=1016$ 千克,转动惯量 $I_z=1463$ 千克·米², $a=0.948$ 米, $b=1.422$ 米,后轮距 $T_w=1.390$ 米, $C_{af}=C_{ar}=26426$ 牛顿/弧度(C_{af} 和 C_{ar} 分别表示前、后轴轮胎的侧偏刚度), $R_{IR}=0.281$ 米。滑模观测器的各增益取值为 $l_1=l_2=100.1$, $k_1=k_2=10.1$,双曲正切函数设计参数 $\mu=10$ 。仿真过程中数据的采样频率为 100HZ,离散的周期 $T=10$ 毫秒,设定角速度传感器的测量噪声是均值为 0、标准差为 0.178 弧度/秒的高斯白噪声。

[0165] 表 1 和图(4)~图(6)给出了仿真实验的结果。表 1 对比了实验过程中利用直测法和利用本发明方法推算车辆非转向左后轮线速度的误差统计结果,表中的误差均是相对于 Carsim 输出的参考值而言的,即这两种方法推算的非转向左后轮线速度与 Carsim 输出的非转向左后轮线速度的差值。另外,直测法指的是利用左后轮轴上角速度传感器测得的角速度乘以轮胎半径进而得到线速度的方法;本发明方法指的是利用本发明中提出的基于

滑模观测器的车辆非转向轮线速度估计方法来推算非转向左后轮线速度的方法。

[0166] 图(4)~图(6)给出了直测法和本发明方法估计非转向左后轮线速度的效果, Carsim 输出的非转向左后轮线速度作为参考值。在图(4)~图(6)中,直测法估计的非转向左后轮线速度以 Original 灰色虚线表示,本发明方法估计的非转向左后轮线速度以 SMO 黑色点划线表示, Carsim 输出的非转向左后轮线速度参考值以 Carsim 黑色实线表示。

[0167] 表 1 两种方法推算非转向左后轮线速度效果对比表(单位:千米/小时)

[0168]

方法	均值	标准差
直测法	0.0051	0.31
本发明方法	0.0019	0.12

[0169] 图(4)是直测法推算的非转向左后轮线速度、本发明方法推算的非转向左后轮线速度和 Carsim 输出的非转向左后轮线速度参考值对比图;图(5)是图(4)中 13 秒至 19 秒的局部放大图,此时汽车以较高速度行驶;图(6)是图(4)中 78 秒至 83 秒的局部放大图,此时汽车以较低速度行驶。由图(4)~图(6)可以看出,本发明的方法相对于直测法在精度上有了大幅度提高,并且无论在低速还是高速的情况下都保持了较高的精度。

[0170] 由表 1 的对比以及图(4)~图(6),可以看出本发明的方法相对于直测法在精度上有了大幅度提高。同时,通过对比可以发现,无论在低速、高速、加速还是减速的情况下,本发明的方法对非转向左后轮线速度的估计精度几乎相同,并保持了较高的精度,说明本发明的方法具有良好的鲁棒性和抗干扰性。

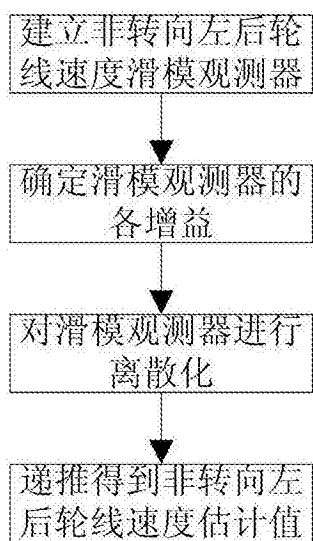


图 1

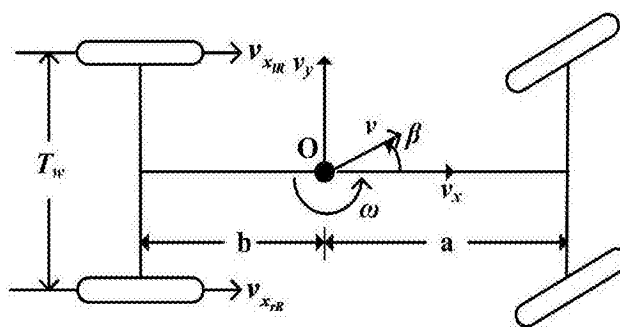


图 2

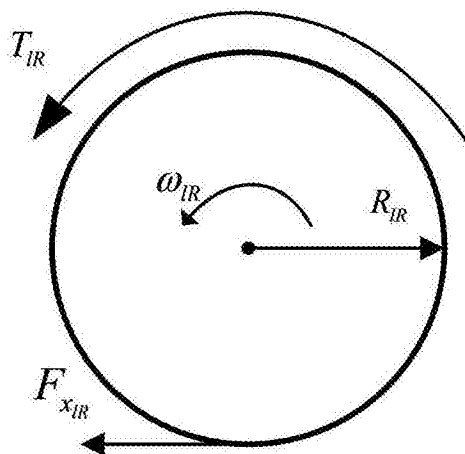


图 3

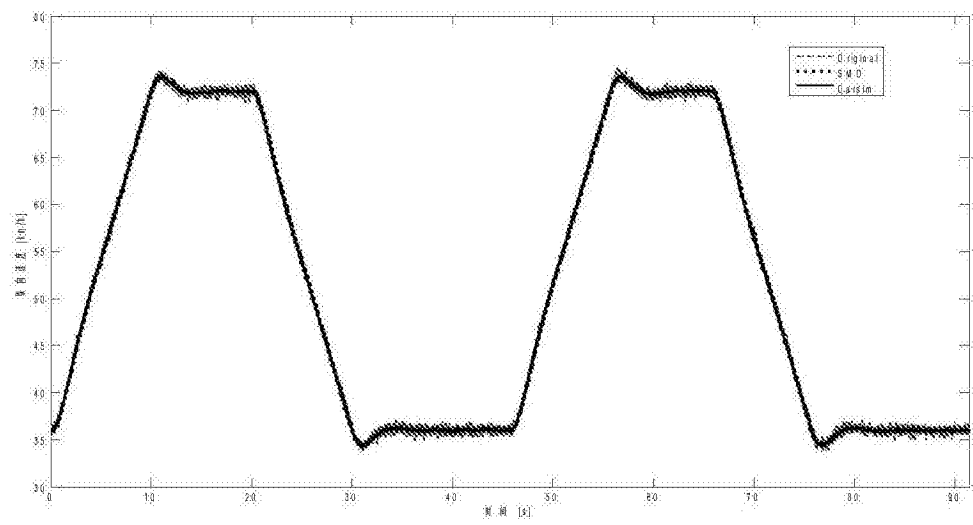


图 4

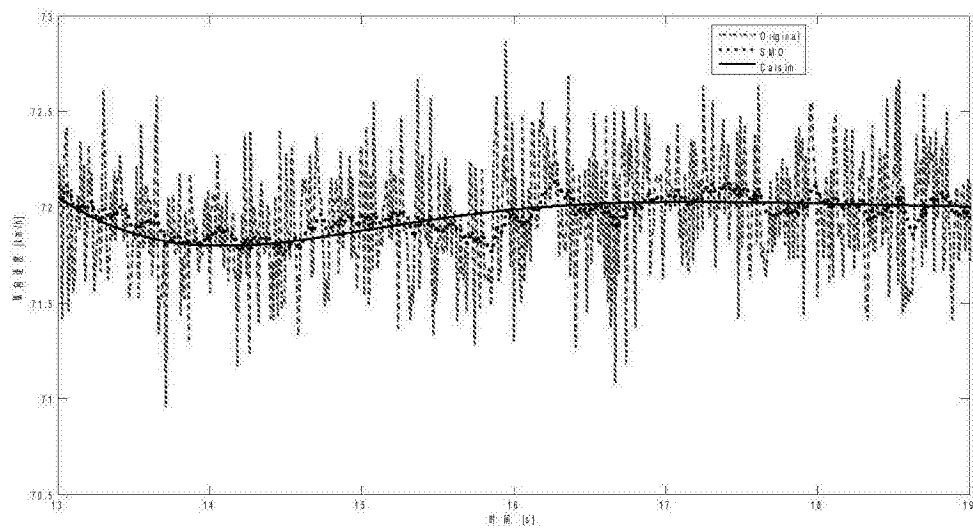


图 5

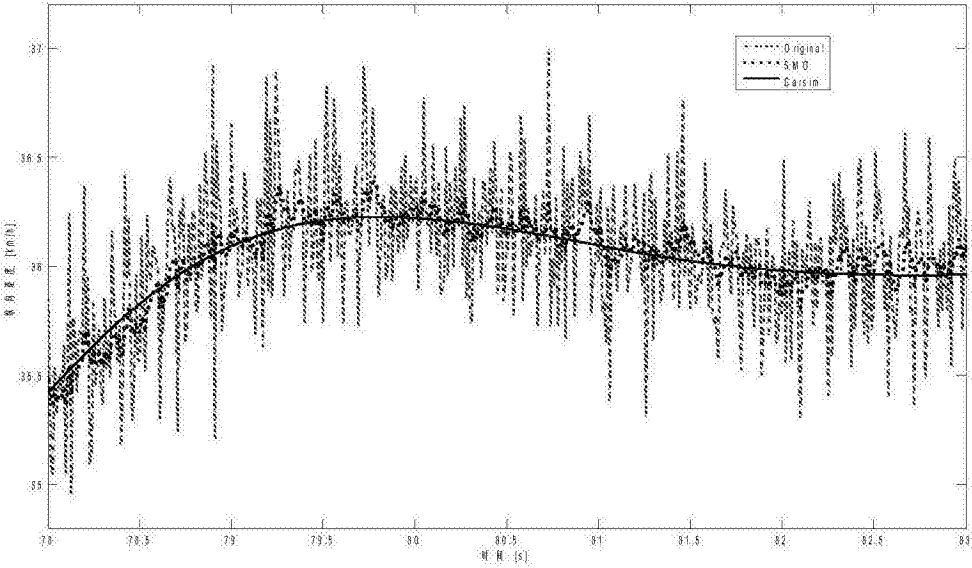


图 6