DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.06.001

基于滑模观测和模糊推理的车辆侧翻实时预警技术*

王 健 余贵珍 张 为 丁能根

(北京航空航天大学交通科学与工程学院,北京100191)

【摘要】 提出一种实时的车辆侧倾状态观测器和侧翻预警算法。建立一种考虑轮胎力非线性特性的扩展 3 自由度车辆模型,并使用非线性最小二乘法拟合轮胎模型的参数。在车辆模型的基础上设计了基于超螺旋理论 的滑模观测器,实时观测车辆的侧倾状态。侧翻预警算法依据当前车辆状态参数及变化趋势,通过构造模糊推理 系统计算车辆侧翻指数,综合评价车辆侧翻的危险程度。使用车辆动力学仿真软件 veDYNA 进行的虚拟道路试验 验证了观测器的观测精度和预警算法的预警效果。

关键词:车辆 侧翻预警 扩展3自由度车辆模型 滑模观测器 模糊推理系统 中图分类号: U461.91 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)06-0001-06

Real-time Rollover Prediction for Vehicle Based on Principles of Sliding Mode and Fuzzy Inference System

Wang Jian Yu Guizhen Zhang Wei Ding Nenggen

(School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract

This paper presented a real-time rollover prediction algorithm based on roll state estimator. An extended 3-DOF vehicle model considering tire nonlinear characteristics was firstly proposed, the parameters of the tire model were obtained by using nonlinear least square method. Vehicle roll state was estimated using sliding mode(SM) observer based on the super twisting algorithm. A rollover critical index(RCI), which indicated the risk of rollover, was developed by a fuzzy inference system(FIS) based on current vehicle state and its trend. The veDYNA dynamic simulation software was used to verify the performances of roll state estimator and roll motion prediction.

Key words Vehicle, Rollover prediction, Extended 3-DOF vehicle model, Sliding mode observer, Fuzzy inference system

引言

侧翻事故是危险性较大的交通安全事故。侧倾 状态观测和侧翻预警可以在侧翻事故发生前,向驾 驶员发出预警信息,让驾驶员采取必要措施(制动、 转向等)或激活主动防侧翻控制装置,降低事故发 生的几率。

按照机理的不同侧翻分为绊倒型侧翻和非绊倒 型侧翻。车辆以较高的侧向速度驶向障碍物会引起 绊倒型侧翻,非绊倒型侧翻一般由过度转向和制动 引起。道路侧翻交通事故中,非绊倒型侧翻约占 2/3^[1]。本文提出的预警方法适用于非绊倒型侧翻。 在非绊倒型侧翻的研究中,大多数侧翻警示算法基 于侧向加速度、侧倾角或侧向载荷转移率门槛 值^[2]。

车辆的侧翻预警技术存在2个关键问题:车辆 侧倾状态的实时观测;如何评价车辆的危险状态。 本文首先建立考虑轮胎非线性特性的扩展3自由度

收稿日期: 2009-08-04 修回日期: 2009-11-09

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50475003)和国家"863"高技术研究发展计划资助项目(2009AA11Z216) 作者简介:王健,博士生,主要从事车辆动力学仿真及控制研究,E-mail: wangj@ buaa.edu.cn 通讯作者:余贵珍,讲师,主要从事智能交通领域研究,E-mail: yugz@ buaa.edu.cn

车辆模型,通过设计基于超螺旋理论的滑模观测器, 实时观测车辆运行过程中的侧倾状态变量。然后建 立模糊推理系统 FIS,综合考虑多种因素计算车辆 侧翻指数 RCI,综合评价车辆侧翻的危险状态。侧 倾状态观测器的估算精度和预警模型的预警效果通 过车辆动力学仿真软件 veDYNA 的虚拟道路试验进 行验证。

1 扩展3自由度车辆模型

车辆模型是车辆侧倾状态观测器的基础,同时 要求准确性和实时性。本文在传统的线性3自由度 车辆模型^[3]的基础上引入反正切函数描述轮胎侧 偏角-侧向力的非线性关系,建立了扩展3自由度车 辆模型。

1.1 车身模型

如图 1 所示的车身模型包括横向运动、横摆运 动以及侧倾运动 3 个自由度。模型忽略汽车纵向和 俯仰方向的动力学特征,假设汽车左右轮动力学关 于 *x* 轴对称。



车身模型的汽车动力学方程包括

$$m(\dot{v} + ur) - m_s h \dot{\phi} + F_{tf} + F_{tr} = 0 \qquad (1)$$

$$I_z \dot{r} + aF_{tf} - bF_{tr} = 0 \tag{2}$$

$$I_x \phi + c_\phi \phi + k_\phi \phi - m_s h(\dot{v} + ur) - m_s gh\phi = 0 \quad (3)$$

 $\beta_f = \frac{v + ar}{\mu} - \delta$

其中

式中

$$\beta_{r} = \frac{v - br}{u}$$

$$I_{x} = I_{xs} + m_{s}h^{2}$$

$$a_{s}b \longrightarrow \text{前轴和后轴到质心的距离}$$

$$\beta_{r} \beta_{r} \longrightarrow \text{前轮和后轮的侧偏角}$$

$$F_{u'}, F_{u'} \longrightarrow$$
作用在前轴和后轴的侧向力

$$u_{s}v \longrightarrow$$
车辆质心处的纵向车速和侧向车速
一 横摆角速度
6 — 转向轮转角

I_z——整车质量绕 z 轴的转动惯量

- I_x——簧载质量绕 x 轴的转动惯量
- I_{xs}——簧载质量绕侧倾轴线的转动惯量
- h、h,——簧载质量质心到侧倾轴线和地面的 距离
- k_a、c_a——簧载质量的侧倾刚度和侧倾阻尼
- m_s、m——簧载质量和整车质量

1.2 轮胎模型

线性3自由度车辆模型中假设轮胎的侧向力和 侧偏角是线性关系。这种假设在侧向加速度不超过 0.4g时能够得到较准确的计算结果^[4],但是在大侧 向加速度条件下,轮胎侧向力计算误差较大。扩展 3自由度车辆模型采用反正切函数来描述轮胎侧偏 角-侧向力的非线性关系^[5],即

$$F_{t} = C_{1} \arctan(C_{2}\beta) \tag{4}$$

式中 C1、C2---轮胎模型参数

 F_{i} β —— 轮胎的侧向力和侧偏角

本文使用非线性最小二乘算法拟合轮胎模型参数,在给定输入、输出数据条件下,寻找一组最优系数,使得

$$\min_{x} \frac{1}{2} |F_{(x,x_{data})} - y_{data}|_{2}^{2} = \frac{1}{2} \sum_{i} (F_{(x,x_{data_{i}})} - y_{data_{i}})^{2}$$
(5)

式中 F——待拟合函数

x_{data、}y_{data} — 轮胎侧偏角 β 和轮胎侧向力 F_t 的试验数据

本文使用的试验数据通过在 veDYNA 平台上进 行虚拟道路试验获取。该平台主要用于车辆动力学 特性的实时分析,可以选择车辆模型、驾驶员模型、 道路模型和驾驶员操作进行虚拟试验。本文试验车 型为轻型 SUV,车辆模型中 a 和 b 分别为 1.478 7 m 和 1.510 4 m, I_z 和 I_x 分别为 5 561.11 kg/m² 和 1 236.11 kg/m², m_s 和 m 分别为 2 053 kg 和 2 562 kg, k_{ϕ} 和 c_{ϕ} 分别为 4 000 N/rad 和 140 000 N·s/rad, h 为 0.4 m。拟合结果见图 2 、3。



 $F_{ir} = -7 \ 200 \arctan(66\beta_r)$

(7)



2 滑模观测器

2.1 构建滑模观测器

建立的非线性车辆模型可以表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{y} = h(\mathbf{x}) \end{cases}$$
(8)

其中 $\mathbf{x} = [v, r, \phi]^{\mathrm{T}}$ $\mathbf{u} = [\delta]$ $\mathbf{y} = [r]$

在扩展3自由度车辆模型的基础上设计基于超 螺旋理论的滑模观测器^[6],对车辆的侧倾状态进行 观测,观测器的量测信号是横摆角速度。

文献[7]研究了非线性系统的可观测性,将其 判定方法应用到式(8)所描述的模型中,该模型的 可观测性矩阵的 Jacobian 矩阵是满秩的,所以该模 型是可观测的。

基于超螺旋理论设计控制律是现有的二阶滑模 算法中唯一不需要滑模变量导数符号信息的算法, 在 *ε* - *ε* 相平面内,不确定状态轨迹在有限时间内 围绕原点螺旋式收敛到原点。滑模观测器的结构见 图 4。



构建滑模观测器^[8]

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}} = f(\hat{v}, \hat{r}, \hat{\phi}) + \lambda_1 |r - \hat{r}|^{1/2} \operatorname{sign}(r - \hat{r}) + Z_1 \\ \dot{\boldsymbol{y}} = C \hat{\boldsymbol{x}} \\ \dot{\boldsymbol{Z}}_1 = \lambda \operatorname{sign}(r - \hat{r}) \end{cases}$$
(9)

其中 λ₁、λ₂ 是所设计滑模观测器中的修正因子。该 观测器的收敛性证明见文献[9]和[10]。

2.2 计算侧向载荷转移率(LTR)

LTR 可以定义为左右侧轮胎垂直载荷之差与总 的轮胎载荷比值,即

$$L = \frac{F_{ZR} - F_{ZL}}{F_{ZR} + F_{ZL}}$$
(10)

当车辆直线行驶时,LTR 一般为零,当车辆一侧 轮胎离地,即将发生侧翻时 LTR 为±1。LTR 作为 侧翻预警指标具有一定通用性,不需要测定或估算 不同类型汽车的侧翻阈值。Hyun 和 Langari 提出一 种只需要簧载质量侧倾角就可以计算 LTR 的方 法^[11],适合实时性要求较高的计算场合。LTR 可以 表示为

$$L \approx K_r \phi \tag{11}$$

式中 K,——等效刚度系数

通过虚拟道路试验可以标定 *K*, 。本文试验车型的 *K*, 值为 13.8。

2.3 计算距车辆侧翻发生时间(TTR)

Chen 和 Huei 提出通过计算距车辆侧翻发生时 间 TTR 评价侧翻危险程度的方法^[12]。TTR 的计算 假定当前时刻输入(转向角、转向角速度、车速等) 在可预测的未来一段时间保持不变,并将其作为初 始条件,车辆从当前时刻运行到产生侧翻(即一侧 轮胎离开地面)时所需的时间定义为 TTR,表示为 t。TTR 越小,表明车辆侧翻风险越高,TTR 为零表 明车辆正在发生侧翻。正常的行驶条件下,为了保 持计算实时性,设置 TTR 的最大值为3 s。

3 侧翻预警算法

构建模糊推理系统计算车辆侧翻指数(RCI), 用作车辆侧翻预警。算法结构见图 5。



Fig. 5 Rollover prediction scheme

3.1 侧翻分析

为了计算 RCI,需要首先分析影响侧翻的因素 及其门槛值。图 6 是静态的车辆侧翻分析结果^[13], 表明了车辆结构参数(质心高度、轮距、侧倾刚度 等)和车辆状态变量(侧倾角和侧向加速度)门槛值 之间的关系。

如图 7 所示,预警模型在侧倾角-侧倾角速度 相平面的基础上,综合考虑了动态条件下影响侧翻 的因素。对侧倾角-侧倾角速度相平面内进行了区



图 6 静态的侧翻分析结果

Fig. 6 Static rollover characteristic of a suspended vehicle



图 7 侧倾角-侧倾角速度相平面内的危险区域和 安全区域划分结果

Fig. 7 Stable/dangerous regions on the roll angle-roll rate phase plane

域划分:

A 区: 侧倾角和侧倾角速度都已超过门槛值, 若不施加主动防侧翻控制,车辆马上会发生侧翻。

B 区:侧倾角和侧倾角速度都还未超过门槛 值,但是侧倾角有变大的趋势,车辆在这个区域内的 稳定状态取决于侧向加速度的大小。

C 区: 位于侧倾角门槛值附近,此时侧倾角绝 对值较大,且有变小的趋势。但是如果车辆的 TTR 值或 LTR 值很小,车辆状态有可能从安全区域转移 到危险区域。

D区:位于相平面的二、四象限和一、三象限中 靠近原点的部分,此时侧倾角和侧倾角速度符号相 反。侧倾角有变小的趋势,或是侧倾角和侧倾角速 度都不大,车辆发生侧翻的可能性很小。

3.2 模糊推理系统 FIS

根据侧翻分析,构建模糊推理系统计算车辆侧翻指数。FIS 的输入量为[$\phi \dot{\phi} a_y t L$],输出量为RCI指数,用 R 表示。按表 1 定义各输入量和输出量的模糊子集和取值范围。隶属函数采用 gauss2mf函数。

限于篇幅,输入量只给出 φ 的隶属函数,见 图 8,输出量 *R* 的隶属函数见图 9。

根据上节侧翻分析中对危险区域的划分建立如 下模糊规则:

If (PHI is NB) then (RCI is Very Dangerous)

If (PHI is PS) and (DPHI is not PB) then (RCI is Stable)

去模糊化采用重心法。

表1 模糊子集和取值范围定义

Tab. 1 Definition of membership function and range

输入量和输出量	模糊子集	取值范围
φ ∕(°)	NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB	[-8,8]
$\dot{\phi}/(\circ) \cdot s^{-1}$	NB, NS, ZE, PS, PB	[-50,50]
$a_y/\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-2}$	NB, NS, ZE, PS, PB	[-8,8]
t/s	PS, PB	[0,3]
L	PS, PB	[0,1]
R	Stable, Dangerous, Very Dangerous	[0,1]



当 RCI 超过 0.6 时,即认为车辆处于侧翻危险 状态,需要驾驶员采取必要措施防止事故的发生。

4 仿真结果

ISO3888 Part2 双移线操作是 NHTSA 检验车辆 侧翻性能的 4 种基于驾驶员的闭环操作之一^[1],本 文涉及的道路试验均选择双移线操作。

4.1 车辆模型验证

使用线性轮胎模型和非线性轮胎模型的仿真结 果对比见图 10。在大侧向加速度条件下(最大值超 过 6 m/s²),使用非线性轮胎模型的扩展 3 自由度车 辆模型能够更准确地计算出车辆的横摆角速度、侧 向加速度和质心侧偏角等车辆状态参数。

4.2 滑模观测器的观测结果

选用3种最高车速下的双移线工况检验滑模观测器对侧倾角的观测效果。使用滑模观测器和仅使用扩展3自由度车辆模型的观测结果见图11,数据分析见表2、3。



atan tire model



侧倾角观测结果

Fig. 11 Comparison of estimated roll angle between SM observer and extend 3-DOF vehicle model
(a) 70 km/h
(b) 80 km/h
(c) 90 km/h

表 2 侧倾角估算的最大误差值 $\max |\varepsilon_{\phi}| / \max |\phi|$ Tab. 2 Maximum values for errors in estimated

roll angle

%

	车速/km·h ⁻¹			
侠型	70	80	90	
滑模观测器	32.72	30. 48	36.03	
3-DOF 车辆模型	62.29	50.07	47.37	

数据分析结果表明,使用滑模观测器对侧倾角 进行观测,无论是最大误差还是误差的均方根值均 小于仅使用扩展3自由度的车辆模型。

4.3 模糊推理系统输出结果

设计稳定工况和极限工况下的双移线操作,比

表 3 侧倾角估算的均方根值 $RMS|_{\mathcal{E}_{\phi}}|/max|\phi|$

Tab.3 RMS values for errors in estimated roll angle

%

世刊	车速/km·h ⁻¹			
侠型	70	80	90	
滑模观测器	5.371	4.731	5.872	
3-DOF 车辆模型	13.53	10.54	8.644	

较 RCI 的输出结果。稳定工况和极限工况的区别 在于移线时车速不同,分别为140 km/h和80 km/h。 图 12 是侧倾角-侧倾角速度相平面对比结果, 图 13 是侧向加速度对比结果,图 14 是 LTR 对比结 果,图 15 是 RCI 对比结果。由于两种工况的最高车 速不同,变道的时刻也不同。



图 12 侧倾角-侧倾角速度相平面对比结果

Fig. 12 Comparison of roll angle-roll rate phase plane between stable maneuver and dangerous maneuver



图 13 侧向加速度对比结果

Fig. 13 Comparison of estimated lateral acceleration

between stable maneuver and dangerous maneuver

(a) 80 km/h (b) 140 km/h

从图 12~14 中可以看出,稳定工况下侧倾角一侧倾角速度轨迹在较小范围内变化,而极限工况下的侧倾角速度轨迹已经越过了安全区域 (-6.25 ϕ -50 < $\dot{\phi}$ < -6.25 ϕ +50($\phi \in [-8,8]$)), 并且侧向加速度和 LTR 的变化范围要远大于稳定 工况。从图 15 中可以看出,稳定工况下的 RCI 值均 未超过 0.6 的预警值;极限工况下,虽然侧倾角仅在



(a) 80 km/h (b) 140 km/h

部分时间超过门槛值,但是由于其侧倾角速度和侧向加速度均较大,整体分析车辆仍处于侧翻危险状态,RCI值基本保持在0.6以上。

5 结论

(1)建立了一种基于扩展3自由度车辆模型, 使用滑模观测技术的车辆侧倾状态观测器。扩展3 自由度车辆模型在线性3自由度车辆模型的基础上 使用反正切函数来描述轮胎侧偏角-侧向力的非线 性关系,轮胎模型中的参数在虚拟道路试验数据的



(a) 80 km/h (b) 140 km/h

基础上使用非线性最小二乘法拟合得到。在扩展3 自由度车辆模型的基础上设计了基于超螺旋理论的 滑模观测器,以横摆角速度作为量测量,对车辆侧倾 状态参数进行观测。

(2)基于侧倾状态观测器,构造了模糊推理系统 FIS,通过分析影响车辆侧翻的因素建立了模糊 规则,计算车辆侧翻指数 RCI,评价车辆侧翻的危险 程度。设计了稳定工况和极限工况下的双移线操作 比较 RCI 的输出结果。试验结果表明, RCI 指数能 够综合考虑多种因素评价车辆的侧翻危险状态。

参考文献

- 1 National Highway Traffic Safety Administration. A comprehensive experimental examination of test maneuvers that may induce on-road, untripped, light vehicle rollover-phase IV of NHTSA's light vehicle rollover research program [R]. National Highway Traffic Safety Administration, 2002.
- 2 Rakheja S, Pichè A. Development of directional stability criteria for an early warning safety device [C]. SAE Paper 902265, 1990.
- 3 Jangyeol Y, Kyongsu Y. A rollover mitigation control scheme based on rollover index [C] // Proceedings of the 2006 American Control Conference, Minneapolis, 2006.
- 4 Abe M. Vehicle dynamics and control for improving handling and active safety: from four-wheel steering to direct yaw moment control[J]. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, 1999, 213(2): 87 ~ 101.
- 5 Xiaojie G, Zhuoping Y, Jens N, et al. Sideslip angle estimation based on input-output linearisation with tire-road friction adaptation [J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(2): 217 ~ 234.
- 6 Davila J, Fridman L, Levant A. Second-order sliding mode observer for mechanical systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(11): 1785 ~ 1789.
- 7 Fridman L, Shtessel Y, Edwards C, et al. Higher-order sliding-mode observer for state estimation and input reconstruction in nonlinear systems[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2008, 18(4): 399 ~ 412.
- 8 Levant A. Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control [J]. International Journal of Control, 1993, 58(6): 1 247 ~ 1 263.
- 9 Levant A. Robust exact differentiation via sliding mode technique[J]. Automatica, 1998, 34(3): 379 ~ 384.
- 10 Levant A. Higher-order sliding modes, differentiation and output-feedback control[J]. International Journal of Control, 2003, 76(9~10): 924~941.
- 11 Hyun D, Langari R. Modeling to predict rollover threat of tractor-semitrailers [J]. Vehicle System Dynamics, 2003, 39(6): 401 ~ 414.
- 12 BoChiuan C. Warning and control for vehicle rollover prevention [D]. Ann Arbor, MI: Univ. of Michigan, 2001.
- 13 Peter J S, David N, Edward J W, et al. Electronics and algorithms for rollover sensing [C]. SAE Paper 2004 01 0343, 2004.