

汽车侧翻预警及防侧翻控制

金智林 翁建生 胡海岩

(南京航空航天大学车辆工程系, 南京 210016)

摘要 为了减少汽车侧翻事故,提出了一种基于模型的汽车侧翻预警算法以及在预警基础上的防侧翻控制算法. 预警算法通过三自由度线性汽车侧翻模型计算将来一段时间内汽车横向载荷转移律的绝对值,由侧翻条件得到侧翻危险时间;控制算法根据预警时间来触发比例-微分控制器对汽车实施控制. 结果表明,预警算法能够及时准确预测汽车侧翻危险,而控制方法可以更好地发挥制动器效能,防止汽车侧翻.

关键词 侧翻预警, 横向载荷转移律, 防侧翻, 比例-微分控制

引言

汽车侧翻是一项重要安全问题. 根据美国公路安全局(NHTSA)的统计数据,汽车侧翻事故的危害程度仅次于汽车碰撞事故而居第二位. 汽车产生侧翻时,驾驶员往往来不及采取有效措施,而侧翻事故的危害则是致命的. 因此,汽车侧翻已成为全世界瞩目的一类安全问题.

近年来,国内外学者和企业非常关注汽车抗侧翻性能分析和主动安全控制研究. 其中, Sampson 和 Cebon 提出了一种液压主动横向稳定杆来抗侧翻^[1]; Chen 和 Peng 采用主动刹车措施来提高汽车抗侧翻能力^[2]; Wollherr 等采用主动转向防止汽车侧翻^[3]; 王昊等提出的半主动悬架开关控制策略,也可以对簧载质量的侧倾加速度进行有效控制^[4]. 汽车应用中, Ford 公司利用主动制动研制的侧翻稳定控制(RSC)系统及 Bosch 公司针对操纵稳定性研制的电子稳定程序(ESP)也能改善汽车抗侧翻的性能. 这些主动抗侧翻措施都是实时的,只能在达到侧翻域值时才开始执行,进而要求执行机构能快速响应,或者富有经验的驾驶员能及时采取控制措施. 然而,执行机构和驾驶员的反应总需要一定时间. 如果能超实时对汽车侧翻进行预警,提前了解侧翻危险情况,将有助于主动抗侧翻系统更加可靠地抑制侧翻事故,同时提前为驾驶员提供侧翻危险信号,让驾驶员能及时采取有效措施防止汽车侧翻. 因此,通过对汽车侧翻进行准确预警再控制来减少侧翻事故已经成为汽车防侧翻研究的

前沿热点课题. Chen 和 Peng 针对重型车提出了一种基于侧翻时间的预警算法^[5]. 该算法具有超实时性,但是由于以侧倾角或者横向加速度的值超过相应的极限值为产生侧翻的条件,对于不同类型的汽车需要测量或估算侧翻时相应的侧翻阈值.

本文提出了一种基于模型的侧翻预警算法及基于预警的防侧翻控制算法. 预警算法中建立了3自由度侧翻模型,选取横向载荷转移律的绝对值为侧翻指标,根据从当前状态计算模型的预测横向载荷转移律得出侧翻预警时间值. 在控制算法中,根据预警值决定在汽车危险情况下,实施比例-微分控制算法,防止侧翻. 由典型工况仿真分析的结果表明,预警算法能够及时准确地计算出汽车的侧翻时间,建立的预警的控制算法可以更好地利用制动器的效能,有效地防止汽车侧翻.

1 汽车侧翻模型

侧翻模型是研究汽车侧翻预警算法的基础,只有简单有效,才能进行实时计算. 因此,建立能准确反映汽车侧翻规律性的简单模型对于预警算法的设计至关重要.

本文建立了图1所示的线性三自由度汽车侧翻模型. 该模型忽略汽车纵向和俯仰方向的动力学特征,并假设汽车左右轮动力学关于 x 轴是对称的,即模型由“自行车模型”和侧倾平面模型组成,包括沿 y 方向的横向运动,绕 z 轴的横摆运动,以及绕 x 轴的侧倾运动. 在轮胎相对汽车转角很小的

情况下,汽车质心速度 u 近似为一个常数. 根据此模型得到汽车侧翻的动力学方程

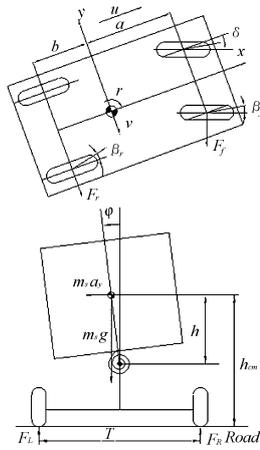


图1 汽车侧翻模型

Fig. 1 Vehicle Rollover Model

$$\begin{cases} m(\dot{v} + ur) - m_s h \ddot{\phi} = -2k_f \beta_f - 2k_r \beta_r \\ I_z \ddot{\phi} = -2ak_f \beta_f + 2bk_r \beta_r + M \\ I_x \phi \ddot{m}_s h(\dot{v} + ur) = m_s gh\phi - c_\phi \dot{\phi} - k_\phi \phi \end{cases} \quad (1)$$

其中 m 为整车质量, m_s 簧载质量, h 为侧倾中心到质心距离, h_{cm} 重心高度, I_x 簧载质量绕 x 轴(经过侧倾中心)的转动惯量, I_z 为横摆转动惯量, k_ϕ 和 c_ϕ 为悬架等效侧倾刚度和阻尼系数, k_f 和 k_r 分别为前后轮侧偏刚度, T 为左右轮距宽度, M 为执行机构制动产生的抗横摆力矩.

考虑侧倾外倾以及侧倾转向的影响,可以得到前后轮侧偏角为

$$\begin{cases} \beta_f = \frac{v + ar}{u} - \delta - c_f \phi \\ \beta_r = \frac{v - br}{u} - c_r \phi \end{cases} \quad (2)$$

c_f 和 c_r 分别为侧倾过程中由于侧倾外倾和侧倾转向对前后轮侧偏角影响系数.

2 侧翻预警算法

2.1 侧翻预警

侧翻预警时间(Time - To - Rollover)定义为固定当前时刻输入,以当前时刻状态为初始条件,汽车运行到产生侧翻(即一侧轮胎离开地面)的时间. TTR 能实现超实时地对汽车进行侧倾平面内的动力学预警.

预警算法流程如图2所示. 在该算法中,先要建立一个简单且能准确反映汽车侧翻规律性的模

型,以汽车当前时刻的运行状态为初始值,按照汽车侧翻规律以步长为 T_s 计算模型的侧翻指标,当该指标第一次满足侧翻条件时记下计算步数 N ,即得到汽车侧翻预警时间为 $TTR = N * T_s$. 为了减小模型计算量,保证预警的实时性,需要设定一个侧翻预警上限时间 X 秒. 如果在 X 秒内计算侧翻指标不满足侧翻条件则停止计算,设置侧翻预警时间为 X 秒. 因此,当得到的预警时间为 X 秒时,可认为汽车没有侧翻危险,小于这个值则认为汽车存在侧翻危险性,而当 TTR 值为0时,汽车正发生侧翻.

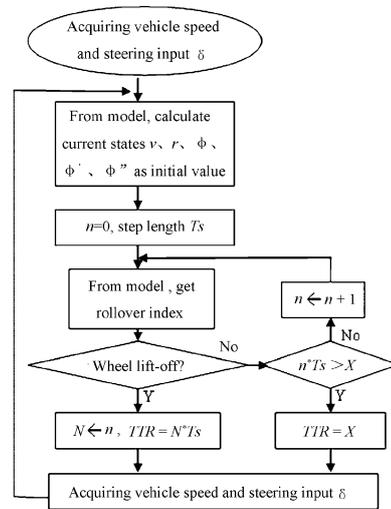


图2 侧翻预警算法流程图

Fig. 2 Flow Chart of Rollover Warning Algorithm

在预警算法中,假设从当前时刻运行到产生侧翻这段时间内汽车外部输入条件不发生变化,而汽车实际行驶时,汽车外部输入可能时刻变化的. 由于预警算法计算时间非常短,在完成一次预警的时间内,汽车外部输入变化可以忽略.

2.2 侧翻条件

为了使预警算法更具通用性,选取横向载荷转移率(Lateral - load Transfer Rate)的绝对值为侧翻指标. LTR 定义为左右侧轮胎垂直载荷之差与总的轮胎载荷比值,即

$$LTR = \frac{F_L - F_R}{F_L + F_R} \quad (3)$$

汽车侧倾时,左右轮胎垂直载荷发生转移,即 LTR 的取值范围为 $[-1, 1]$, 当 $LTR = 0$ 时,汽车没有发生侧倾;当 $LTR = \pm 1$ 时,一侧轮胎离地,发生侧翻. 因此,对于不同类型汽车,满足侧翻条件都是 LTR 绝对值大于或等于1,即该算法预警具有一定通用性,不需要测定或估算不同类型汽车的侧翻阈值.

选择 LTR 作为侧翻指标的问题在于,汽车行驶过程中左右车轮的载荷不易测量,通过左右车轮的载荷来预测未来 LTR 的值很困难.为此,在汽车侧翻预警算法中对 LTR 指标进行线性变换,转换成可以根据模型计算的系统输出.把式(3)代入模型计算可得

$$LTR = \frac{2m_s}{mgT} [h_{cm}(\dot{v} + ur - h\ddot{\phi}) + gh\phi] \quad (4)$$

转换后的 LTR 为汽车的状态参数的函数,这些状态参数的未来时刻值都可以通过模型进行计算获得,因此转换后的 LTR 可以用做预警侧翻因子,以便简化车侧翻条件.

2.3 预警算法超实时性

预警算法要实现超实时性能,受到四个因素的影响:模型的复杂程度、步长 T_s 的选取、预警上限值 X 的选取以及处理器的运算性能.

步长大,则得到的最小预警时间大,预警的精度差;步长小,则得预警的精度高,实时性变差.预警上限值小,则要求控制器和执行机构响应速度快;预警上限值大则影响预警算法实时性.本文根据实践中汽车运行情况,选取 $T_s = 0.001s$, $X = 3s$. 计算结果表明,在 Pentium IV 2.4 G 的 CPU 下运行一次预警算法的最大时间(当预警值为 X 时)为 2.724ms.两者相比,计算效率为 1101 倍;即在 1 ms 时间内可以预测到汽车 1101 ms 内的侧翻危险状况.这充分说明预警算法具有超实时性能.

3 基于预警的 PD 控制

在控制过程中,选择适当的触发条件触发控制器使执行机构产生制动力矩是非常重要的.大量研究中根据经验选择侧翻域值为触发控制器的条件,即 LTR 绝对值大于 0.9.若这个域值取的很大,控制实时性得不到保证;若这个值很小,则频繁触发执行机构动作,不仅要消耗更多的能量而且影响执行机构的寿命以及汽车行驶的性能.为了能实时有效地对汽车侧翻实施控制,本文在侧翻预警的基础上提出了一种新的防侧翻控制.

基于预警算法的 PD 反馈控制系统如图 3 所示,选择 LTR 为控制目标,通过 A/D 采集汽车当前的前轮转角输入和车速计算侧翻预警值,当预警值小于 X 时触发控制器,控制核心算法采用经典的比例-微分控制算法,输出控制信号经过 D/A 转换

后驱动制动器在不同轮上产生不同的制动力,得到抗横摆力矩,从而实现汽车的防侧翻控制.

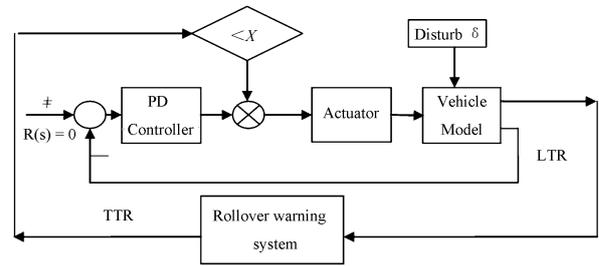


图 3 基于侧翻预警的防侧翻控制流程图

Fig. 3 Flow Chart of Anti-rollover Control strategy

在主动防侧翻控制中,利用制动器为执行机构产生抗横摆力矩是一种非常实用而且有效的控制措施,不需要增加另外的机械机构,同时也能提高汽车操纵稳定性能.本文采用一阶刹车模型的传递函数^[2]作为执行机构的动力学模型, u_c 为控制器输出,则有

$$\frac{M}{u_c} = \frac{1}{0.2s + 1} \quad (5)$$

如图 3,基于预警算法的 PD 反馈控制系统为双输入控制系统,选择 $X = [\dot{\phi} \ v \ r \ \phi]^T$ 为状态变量, $Y = LTR$ 为系统输出控制变量,则系统状态方程为

$$\begin{cases} E \dot{X}(t) = AX(t) + B[\delta(t) \ M(t)]^T \\ Y(t) = CX(t) + D[\delta(t) \ M(t)]^T \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$E = \begin{bmatrix} I_x & -m_s h & 0 & 0 \\ -m_s h & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -c_\phi & 0 & m_s h u & m_s g h - k_\phi \\ 0 & \frac{2k_f + 2k_r}{-u} & \frac{2bk_r - 2ak_f}{u} - mu & 2k_f c_f + 2k_r c_r \\ 0 & \frac{2bk_r - 2ak_f}{u} & \frac{2a^2 k_f + 2b^2 k_r}{-u} & 2ak_f c_f - 2bk_r c_r \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 2k_f & 2ak_f & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{2m_s u h_{cm}}{mgT} & \frac{2m_s h}{mT} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \frac{-2m_s h h_{cm}}{mgT} & \frac{2m_s h_{cm}}{mgT} & 0 & 0 \end{bmatrix} E^{-1} A$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{-2m_s h h_{cm}}{mgT} & \frac{2m_s h_{cm}}{mgT} & 0 & 0 \end{bmatrix} E^{-1} B$$

根据控制要求不仅要使输出接近参考值,同时要控制输出的能量也尽量小,定义性能指标为

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [Y^2(t) + M^2(t)] dt \quad (7)$$

选择最佳控制输出使得该 J 值最小.

由于预警算法采用的是离散模型,所以控制算法也相应采用离散的增量型比例-微分控制算法.

$$\Delta u(k) = k_p [e(k) - e(k-1)] + k_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (8)$$

4 典型工况实例仿真

选取某 SUV 汽车作为预警及防侧翻控制对象,在汽车大回转试验工况下进行预警分析;在最坏行驶试验工况下进行预警及控制仿真研究.汽车参数如下: $m = 1988\text{kg}, a = 1.15\text{m}, h = 0.4\text{m}, I_x = 753\text{kgm}^2, k_{\varphi} = 56957\text{N/rad}, m_s = 1663\text{kg}, b = 1.43\text{m}, h_{cm} = 0.8\text{m}, I_z = 4510\text{kgm}^2, c_{\varphi} = 3496\text{Na/rad}, c_f = 0.055, c_r = 0.070, T = 2.0\text{m}, k_f = 444000\text{N/rad}, k_r = 43600\text{N/rad}.$

4.1 汽车大回转试验工况

当外界输入不变时,如果在发生侧翻事件后回放整个侧翻过程,在侧翻前的第 N 秒钟时刻,此时的 TTR 值为 N 秒,也就是在此刻过后的第 N 秒钟发生侧翻,这时的准确结果应该是斜率为 -1 的直线.大回转试验工况的前轮转角输入为阶跃输入.图4是车速 100km/h 时前轮转角输入为 5° 阶跃的预警结果.预警结果为斜率 -1 的直线,说明该预警算法可以准确预测侧翻危险时间 TTR 值.

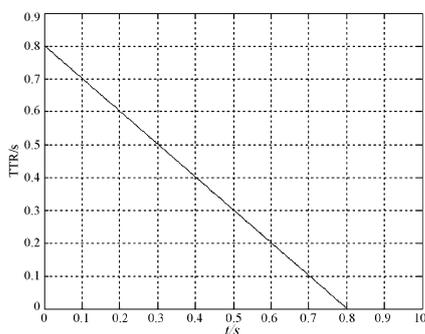


图4 大回转试验工况 TTR 预警结果
Fig.4 Time to Rollover with Step-input Steering

汽车前轮转角输入突然变化引起汽车发生侧翻危险的过程中,能够预测的最大时间为汽车侧翻最大预警值,它可以用来反映汽车侧翻危险程度,这个值越大,则驾驶员或控制系统越能有效采取措施防止汽车侧翻.最大预警值受到车速、前轮转角

以及汽车结构参数的影响.图5分别为 $80、100、120\text{km/h}$ 时不同转角阶跃输入下能预测的最大预警值.显然,车速越高,转角越大(转弯半径越小),最大预的值越小,汽车越容易发生侧翻危险.

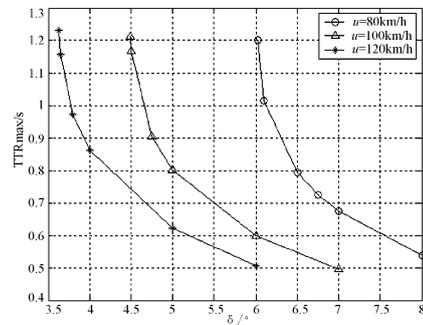


图5 最大预警值
Fig.5 The Maxim Value of TTR

4.2 汽车最坏行驶试验工况

汽车最坏行驶试验工况反映汽车行驶的最恶劣情况,危险性最大.给定前轮转角输入如图6所示,根据参数简易调节方法,取 $KP = 8, KD = 500$,车速 100km/h ,前轮转角最大 5° 的最坏行驶试验工况下进行预警及控制仿真.

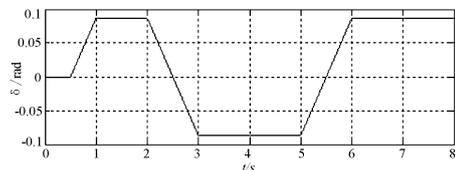


图6 最坏行驶试验工况前轮转角输入
Fig.6 Steering Input of Worst Case

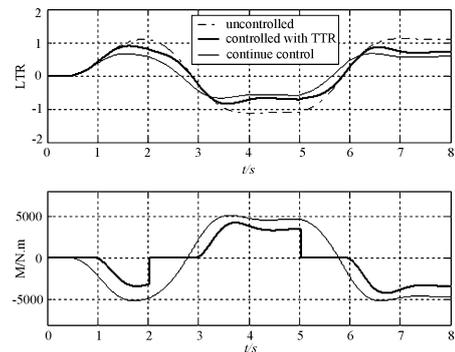


图7 最坏行驶试验工况下防侧翻控制
Fig.7 The Result of LTR in Worst Case

图7(a)为汽车在最坏行驶试验工况时三种不同控制情况下汽车侧翻性能指标横向载荷转移率的动态计算结果.点划线为不加任何控制时的横向载荷转移率,其绝对值在 1.587s 时超过 1 ,汽车发生侧翻;粗实线和细实线分别为采用基于预警的比例-微

分控制算法和不具备预警的连续比例-微分控制算法的横向载荷转移率计算结果. 实施控制后, 横向载荷转移率绝对值都小于1, 表明两种控制方法都能及时启动执行机构产生抗横摆力矩, 从而防止汽车侧翻. 图7(b)为采用两种不同控制方法时要求施加的制动力矩, 可以看出, 采用基于预警的比例-微分控制算法时(粗实线), 执行机构不需要实时动作, 而且需要输出的最大力矩比不具备预警的连续比例-微分控制算法时(细实线)要求输出力矩小, 容易实现; 同时, 在一些不发生危险的时候可以不必触发执行机构动作. 如图7(b)所示, 在0.502-0.952秒, 2.046-2.948秒, 以及5.048-5.948秒区间内不存在侧翻危险时, 采用基于预警的比例-微分控制算法就不需要执行机构动作, 既可以节约能源, 又能更好发挥执行机构的作用防止汽车侧翻.

5 结论

本文提出了基于模型的侧翻预警算法并在预警基础上进行防侧翻控制. 预警算法中采用横向载荷转移率作为侧翻指标, 经过线性变换后不需要实时测量车轮载荷, 也不需要测量或估算汽车侧翻域值, 对不同类型汽车具有相同的侧翻条件. 在外界输入不变时, 预测结果是斜率为-1的直线, 汽车预警计算效率达到1100倍, 表明该算法可以超实时

准确预测汽车的侧翻危险. 基于预警的控制算法采用工程中易于实现的比例-微分控制, 更好地发挥了制动器的效能, 在预测到汽车没有侧翻危险时, 不需要触发控制器. 与连续的比例-微分控制比较, 既节约了能源又减少了制动器的动作频率.

参 考 文 献

- 1 Sampson D. J. M., Cebon D. Active roll control of single unit heavy road vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 2003, 40(4): 229 ~ 270
- 2 Chen Bo, Peng H. Differential-braking-based rollover prevention for sport utility vehicles with Human-in-the-loop evaluations. *Vehicle System Dynamics*, 2001, 36(4-5): 359 ~ 389
- 3 Mareczek J, Wollherr D, Buss M, et al. Rollover avoidance for steerable vehicles by invariance control. Proceedings of European Control Conference, Porto, Portugal, 2001: 3522 ~ 3527
- 4 王昊, 胡海岩. 基于磁流变阻尼器整车半主动悬架的开关控制. *动力学与控制学报*, 2004, 2(4): 71 ~ 76 (Wang hao, Hu haiyan. The on-off control of a semi-active suspension of the full-vehicle model based on MR dampers. *Journal of Dynamics and Control*, 2004, 2(4): 71 ~ 76 (in Chinese))
- 5 Chen Bo, Peng H. Rollover warning for articulated heavy vehicles based on a time-to-rollover metric. *Transaction of the ASME*, 2005, 127(9): 406 ~ 414

ROLLOVER WARNING AND ANTI-ROLLOVER CONTROL FOR AUTOMOBILES

Jin Zhilin Weng Jiansheng Hu Haiyan

(Department of Vehicle Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract To avoid rollover accidents of automobiles, a model-based algorithm for rollover warning and a control strategy for rollover prevention were proposed. In the algorithm, the Time-To-Rollover was computed from a vehicle model of three degrees of freedom, including sway, yaw and roll motions, and the absolute value of the lateral Load-Transfer-Ratio was taken as the rollover index. The proportional-differential control based on TTR was implemented to trigger the brake actuator. The numerical simulations show that the algorithm is able to forecast the rollover risk properly and timely, and the control strategy can improve the effectiveness of brake actuator. As a result, the rollover warning and control will enhance the safety performance of automobiles.

Key words rollover warning, lateral-load transfer ratio, rollover prevention, PD control