

# 基于电动助力转向的汽车防侧翻预警系统研究

李志明

(湖南交通职业技术学院 机电工程学院, 长沙 410014)

**摘要:** 为了使驾驶员能主动感知车辆侧倾状态、防止车辆侧翻, 提出了一种新型基于电动助力转向的防侧翻预警系统; 利用横向载荷转移率的门限值作为防侧翻预警控制的触发条件, 采用助力电机电流补偿控制, 当车辆侧倾较大, 即横向载荷转移率超过门限值时, 预警控制系统使驾驶员操纵转向盘力矩增大, 结合侧翻报警灯工作, 提醒驾驶员车辆正处于危险工况; MATLAB/Simulink 中的仿真分析验证了防侧翻预警控制器能有效的提高车辆的操稳性。

**关键词:** 控制工程; 车辆工程; 侧翻; 电动助力转向

## Study on Vehicle Rollover Warning System Based on Electric Power Steering

Li Zhiming

(Hunan Communication Polytechnic, Changsha 410014, China)

**Abstract:** In order to improve driver's awareness of vehicle roll state and prevent the condition of rollover, a novel vehicle rollover warning system is proposed. Load Transfer Ratio value is acted as a threshold of triggering rollover warning system. When the system is triggered, the assistant torque of EPS motor is reduced, thereby enhancing the driver steering torque, and the rollover warning light is activated. Therefore, the driver can feel the danger driving condition. Simulation results in MATLAB/Simulink show the effectiveness of proposed control strategy to improve vehicle handling stability.

**Keywords:** control engineering; vehicle engineering; rollover, electric power steering

### 0 引言

汽车侧翻是指汽车在行驶过程中绕其纵轴线转动 90 度或更大的角度, 以至车身与地面相接触的一种极其危险的侧向运动<sup>[1]</sup>。鉴于侧翻事故的严重性, 有必要采取主动控制的方式防止侧翻的发生。

国内外的专家学者对于防侧翻的研究主要集中于侧翻预警的判定标准。其中 Rakheja 提出根据车辆侧向加速度是否大于预设的门限值来判断车辆侧翻状态<sup>[2]</sup>。文献 [3-5] 均利用横向载荷转移率 LTR (Load Transfer Ratio) 作为判断侧翻的指标, 这种方法实时性较好且易于操作。当系统检测到车辆侧倾超过门限值而有侧翻趋势时, 会自动发出声光报警信号, 提示驾驶员采取相应措施<sup>[6-7]</sup>。但是突然的蜂鸣声可能会导致驾驶员的过度紧张, 而若单纯采用报警灯, 则可能由于驾驶员目视前方而忽略报警指示灯。

因此, 本文提出基于电动助力转向 EPS (Electric Power Steering) 的防侧翻预警系统。当系统检测到车辆有侧翻趋势时, 自动减小 EPS 的电机助力矩, 使驾驶员操纵转向盘力矩增大, 从而使驾驶员进一步转向变得困难, 能有效防止车辆侧翻的发生。同时系统使侧翻报警灯工作, 提醒驾驶员车辆正处于危险工况。

### 1 系统模型

#### 1.1 车辆侧倾模型

车辆侧倾模型采用 3 自由度非线性模型, 假设车辆为纯转

向工况, 即忽略车轮纵向力的影响, 同时也忽略车辆非簧载质量, 则其动力学方程如下:

$$\begin{cases} ma_x = -(F_{y1} + F_{y2}) \sin \delta_f \\ ma_y + mh_s \ddot{\varphi} = (F_{y1} + F_{y2}) \cos \delta_f + F_{y3} + F_{y4} \\ I_x \ddot{\omega}_r = a(F_{y1} + F_{y2}) \cos \delta_f - b(F_{y3} + F_{y4}) \\ I_x \ddot{\varphi} + (C_{\varphi f} + C_{\varphi r}) \dot{\varphi} + (K_{\varphi f} + K_{\varphi r}) \varphi = mgh_s \dot{\varphi} + ma_y h_s \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $m$  为整车质量;  $a_x$  和  $a_y$  分别为车辆纵向和侧向加速度;  $F_{y1}$ 、 $F_{y2}$ 、 $F_{y3}$  和  $F_{y4}$  分别为左前轮、右前轮、左后轮和右后轮侧向力, 可以由魔术轮胎公式求出<sup>[8]</sup>;  $\delta_f$  为前轮转角;  $\varphi$  为车身侧倾角;  $h_s$  为整车质心至侧倾轴线的距离;  $\omega_r$  为横摆角速度;  $a$  和  $b$  分别为质心至前后轴距离;  $I_x$  和  $I_z$  分别为车辆绕 X 轴和 Z 轴的转动惯量;  $C_{\varphi f}$  和  $C_{\varphi r}$  为前后侧倾角刚度;  $K_{\varphi f}$  和  $K_{\varphi r}$  为前后侧倾角阻尼。

车辆的侧倾运动会造成左右轮的轮荷转移, 轮荷转移后各车轮的垂直载荷如下:

$$\begin{cases} F_{z1} = \frac{mgb}{2l} - \frac{a_x mh_s}{2l} - \frac{ma_y h_f b}{Tl} - \frac{K_{\varphi f} \varphi + C_{\varphi f} \dot{\varphi}}{T} \\ F_{z2} = \frac{mgb}{2l} - \frac{a_x mh_s}{2l} + \frac{ma_y h_f b}{Tl} + \frac{K_{\varphi f} \varphi + C_{\varphi f} \dot{\varphi}}{T} \\ F_{z3} = \frac{mga}{2l} + \frac{a_x mh_s}{2l} - \frac{ma_y h_r a}{Tl} - \frac{K_{\varphi r} \varphi + C_{\varphi r} \dot{\varphi}}{T} \\ F_{z4} = \frac{mga}{2l} + \frac{a_x mh_s}{2l} + \frac{ma_y h_r a}{Tl} + \frac{K_{\varphi r} \varphi + C_{\varphi r} \dot{\varphi}}{T} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $F_{z1}$ 、 $F_{z2}$ 、 $F_{z3}$  和  $F_{z4}$  分别为左前轮、右前轮、左后轮和右后轮垂直载荷;  $l = a + b$  为轴距;  $h_f$  和  $h_r$  分别为前后轴质心至侧倾中心距离;  $T$  为轮距。

#### 1.2 EPS 模型

EPS 所受的力主要有驾驶员作用在方向盘上的操纵力矩、电机的助力矩和转向系统阻力矩。方向盘上的操纵力矩和电机

收稿日期:2014-04-12; 修回日期:2014-05-16。

基金项目:2012 年湖南省教育厅立项课题(ZJA2012005)。

作者简介:李志明(1961-),男,湖南长沙人,教师,工程师,主要从事汽车工程、工程机械、通用机械的研究。

助力矩共同克服转向阻力矩来实现转向过程。

本文采用转向轴助力式电动助力转向系统, 如图 1 所示, 该系统由机械转向系统、转向盘转矩传感器、车速传感器、电流传感器、控制器、助力电机及减速机构组成。建模时将机械转向系统进行了适当的简化, 其动力学方程如下:

$$J_c \ddot{\theta}_c + B_c \dot{\theta}_c = T_d - K_c (\theta_c - \theta_p) \quad (3)$$

$$J_p \ddot{\theta}_p + B_p \dot{\theta}_p = K_c (\theta_c - \theta_p) + T_a - T_r \quad (4)$$

$$\theta_p = i_c \delta_f \quad (5)$$

$$T_r = (F_{y1} + F_{y2})t/i_c \quad (6)$$

式中,  $J_c$  为转向盘和输入轴转动惯量;  $J_p$  为等效输出轴转动惯量;  $B_c$  为转向盘和输入轴阻尼系数;  $B_p$  为等效输出轴阻尼系数;  $\theta_c$  为转向盘转角;  $\theta_p$  为输出轴转角;  $T_d$  为驾驶员操纵转向盘转矩;  $T_a$  为电机助力矩;  $T_r$  为转向阻力矩;  $K_c$  为扭力杆刚度;  $i_c$  为齿轮齿条转向器传动比;  $t$  为车轮拖距。

对于电机模型, 有如下方程:

$$RI + L\dot{I} + K_b \dot{\theta}_m = U \quad (7)$$

$$T_a = i_m K_f I \quad (8)$$

$$\theta_m = i_m \theta_p \quad (9)$$

式中,  $U$  为电枢端控制电压;  $R$  为机电枢电阻;  $L$  为电枢电感;  $I$  为电机电流;  $K_b$  为电机反电动势系数;  $K_f$  为电磁转矩系数;  $i_m$  为减速机构传动比。

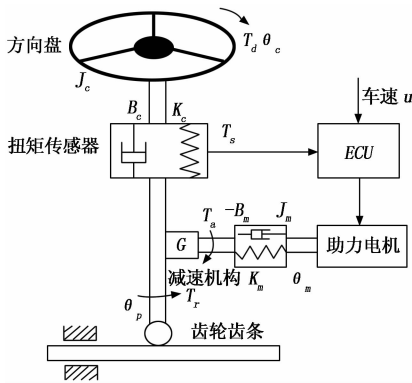


图 1 EPS 结构简图

## 2 防侧翻预警系统控制策略

### 2.1 预警触发条件

本文用横向载荷转移率绝对值的大小作为侧翻触发条件, 载荷转移率绝对值定义为:

$$LTR = \left| \frac{(F_{z1} + F_{z2}) - (F_{z3} + F_{z4})}{F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} + F_{z4}} \right| \quad (10)$$

显然,  $LTR$  的取值范围为  $[0, 1]$ 。当车辆在平坦路面上直线行驶时, 无轮荷转移, 此时  $LTR = 0$ ; 当车辆发生侧翻时, 内侧车轮离开地面, 此时  $LTR = 1$ 。对于防侧翻控制系统, 一般  $LTR$  取值  $0.9^{[5]}$ , 而本文设计的是侧翻预警系统, 需有一定提前量。本文预警触发  $LTR$  取值  $0.8$ 。

### 2.2 预警控制

当检测到  $LTR$  值大于  $0.8$  时, 本文设计的防侧翻预警系统能自动通过 EPS 提高驾驶员操纵方向盘的转矩。如图 2 所示, 在传统 EPS 控制策略中, ECU 接受扭矩传感器测得的转矩信号  $T_s$  和车速传感器测得的车速信号  $u$ , 由离线助力曲线查表得出基本助力电流  $I_b$ 。本文在此基础上, 叠加一个预警补偿电流  $I_c$ , 从而产生驾驶员预警力矩, 该补偿电流与车辆

的侧倾状态即  $LTR$  值有关。叠加后的理想助力电流为  $I_i$ , 此为助力电流理想跟踪电流, 通过电机闭环控制使电机实际电流与理想助力电流一致。预警补偿电流的计算公式如下:

$$I_c = \begin{cases} 0 & 0.0 \leq LTR < 0.8 \\ K(LTR - 0.8) & 0.8 \leq LTR \leq 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $K$  为预警电流增益系数。在此算法下当  $LTR$  值大于  $0.8$  时控制系统被触发, 并且  $LTR$  的值越大,  $EPS$  电机助力矩越小, 从而使驾驶员操纵转向盘力矩越大。

另外防侧翻预警系统被触发后, 报警电路自动接通, 驱动 LED 数码管工作, 向驾驶员发出侧翻报警指示。

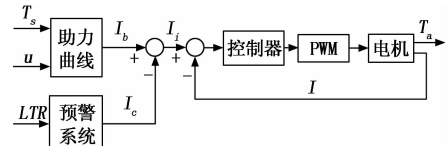


图 2 基于 EPS 预警控制框图

## 3 防侧翻预警系统设计与实现

根据上节提出的防侧翻预警系统控制策略, 进行防侧翻预警系统设计。当汽车达到预警触发条件, 即进入侧翻危险状态时, 防侧翻预警装置能够及时驱动 EPS 增大操纵方向盘的力矩, 并且向驾驶员示警, 便于驾驶员采取措施, 避免汽车侧翻事故的发生。

防侧翻预警装置包括左右载荷传感器、微处理器、电动助力转向系统和报警灯等。左右载荷传感器安装在车厢与车架之间支撑处, 用于实时检测汽车的实际装载情况, 并及时将数据传递给微处理器。微处理器根据左右载荷信号计算出横向载荷转移率绝对值的大小, 以判断是否需要加入防侧翻预警控制。如横向载荷转移率绝对值超过门限值, 则触发 EPS 电流补偿控制, 增大方向盘操纵力矩, 使进一步转向变得困难。另外, 微处理器通过 LED 驱动器, 使 LED 报警灯工作, 提示驾驶员此时车辆处于将要侧翻的危险状况。

## 4 仿真试验分析

为了验证本文提出的防侧翻预警控制算法的有效性, 在 MATLAB/Simulink 中建立车辆模型和控制器模型, 进行仿真试验。仿真分析包括转向盘转角斜坡阶跃输入和转向盘力矩斜坡阶跃输入仿真。

### 4.1 转向盘转角输入仿真

仿真条件为车速  $70 \text{ km/h}$ , 方向盘转角信号从  $1 \text{ s}$  时开始施加, 再经过  $3 \text{ s}$  后达到稳态值  $70^\circ$ 。车辆  $LTR$  值和转向盘力矩变化如图 3、4 所示。可见,  $3.5 \text{ s}$  时  $LTR$  值超过  $0.8$ , 此时侧翻预警系统被触发, 使转向盘力矩显著突变增大, 以提醒驾驶员此时车辆处于危险工况。

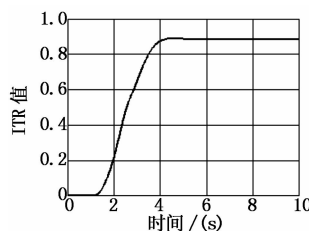


图 3 转角输入时 LTR 值

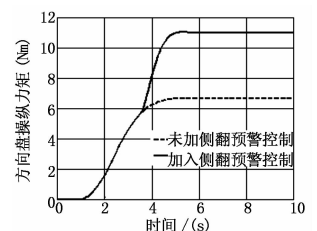


图 4 转角输入时方向盘力矩对比

### 4.2 转向盘力矩输入仿真

仿真条件为车速 70 km/h，方向盘力矩信号从 1 s 时开始施加，再经过 3 s 后达到稳态值 6.5 Nm。仿真结果如图 5~7 所示。可见，当 4.7 秒时 LTR 值超过 0.8，此时侧翻预警系统被触发，使进一步转向所需转向力矩变大，即转向变得困难，此时转向盘转角较未加入控制时减小，从而使车辆侧倾角和 LTR 值均随之减小，即车辆侧倾趋势减弱。

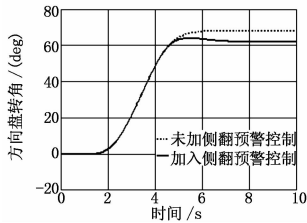
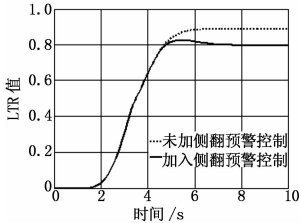


图 5 力矩输入时 LTR 值对比

图 6 力矩输入时方向盘转角对比

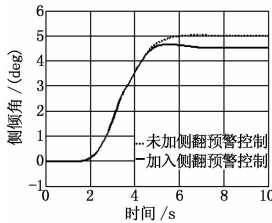


图 7 力矩输入时车辆侧倾角对比

## 5 结论

(1) 建立了车辆侧倾动力学方程和电动助力转向动力学

方程，并在 MATLAB/Simulink 中建立模型。

(2) 提出了防侧翻预警触发条件，设计了防侧翻预警控制器。

(3) 仿真结果表明当车辆有侧翻危险时，防侧翻预警系统能使驾驶员操纵转向盘力矩显著增大，从而有效得使驾驶员主动感知车辆的侧倾状况，并防止车辆侧翻。

### 参考文献:

[1] 余志生. 汽车理论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.  
 [2] Rakheja S. Development of directional stability criteria for an early warning safety device [J]. SAE Technical Paper, 902265, 1990.  
 [3] Odenthal D., Bunte T., Ackermann J., Nonlinear steering and braking control for vehicle rollover avoidance [A]. Proceedings of European Control Conference [C]. Karlsruhe, Germany, 1999.  
 [4] Solmaz, S., Corless, M., Shorten, R. A methodology for the design of robust rollover prevention controllers for automotive vehicles with active steering [J], International Journal of Control, 2007, 80 (11): 1763 - 1779.  
 [5] 徐延海. 基于主动转向技术的汽车防侧翻控制的研究 [J]. 汽车工程, 2005, 27 (5): 518 - 521.  
 [6] 夏晶晶, 胡晓明, 陈杰. 自卸汽车侧翻预警装置设计 [J]. 机械设计与制造, 2011, 7: 25 - 27.  
 [7] 陈启鹏, 熊巧巧, 周成. 汽车侧翻预警报警装置的研究 [J]. 机械与电子, 2012, 11: 64 - 66.  
 [8] Bakker E., Nyborg L., Pacejka H. B., Tyre Modelling for Use in Vehicle Dynamics Studies [J]. SAE Technical Paper, 870421, 1987.

(上接第 2927 页)

信号一路正弦信号), 采样率为 12 kHz, 采集的声音信号频率为 1 kHz, 12 个点为一个周期。13、14 列为帧计数, 15、16 列为帧尾。图 7 图 8 分别为上位机软件对得到数据还原回的图形 (直流量与正弦波)。纵坐标表示电压值, 单位为伏 (V), 横坐标为时间, 单位为秒 (s)。

## 5 结束语

该系统对无线传感器网络节点数据采集与存储进行设计, 在高速采集数据的同时保证了数据的高精度, 利用双平面流水存储的方法对混合编帧后的数据进行了存储, 以保证数据进入时系统可以正常工作。测试结果表明, 该采集存储方式精度高、稳定性强, 为系统正常工作与后续分析提供了有力保障。

### 参考文献:

[1] 赵海, 赵杰, 刘铮, 等. 一种无线传感器网络节点的设计与实现 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2009, 30 (6): 809 - 812.  
 [2] 马明建. 数据采集与分析技术 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2005.  
 [3] 佟吉钢, 张振新, 陈增强, 等. 基于 FPGA 的无线传感器网络节点设计 [J]. 传感技术学报, 2009, 22 (3): 417 - 421.  
 [4] 刘志平. 基于 FPGA 的高速数据采集存储系统设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.  
 [5] 李超, 王虹现, 邢孟道, 等. 高速大容量 FLASH 存储系统设计 [J]. 火控雷达技术, 2007, 36 (1): 83 - 88.

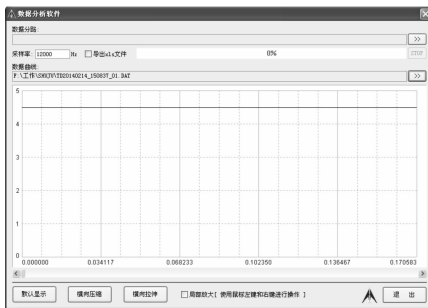


图 7 数据处理后还原回的直流信号

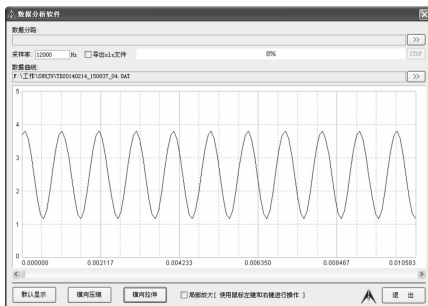


图 8 数据处理后还原回的正弦信

位机显示, 1~12 列为 6 路通道采集的数据 (其中五路直流