

# 基于半主动悬架的车辆抗侧倾控制研究

金传琦

(江苏联合职业技术学院 无锡交通分院, 江苏 无锡 214151)

**摘 要:**悬架系统可提高乘坐舒适性,用于抑制车身的侧倾。基于车辆多工况行驶下的抗侧倾控制需求,建立带有半主动悬架系统的车辆四自由度动力学模型,以空气悬架和电机式主动稳定杆作为执行器,分别选用模糊控制和滑模控制来设计抗侧倾控制器,通过 Matlab/Simulink 与 Carsim 建立联合仿真模型来验证所设计控制策略的有效性。仿真结果表明:在双移线和鱼钩工况下,使用带有主动横向稳定杆的半主动悬架系统可有效减小车辆的侧倾角,降低车辆侧翻风险。

**关键词:**半主动悬架;空气悬架;主动稳定杆;底盘域;抗侧倾控制

**中图分类号:**U463.33

**文献标志码:**A

**文章编号:**2097-0358(2022)4-0038-06

## 0 引言

悬架系统的主要作用是抑制路面激励引起的车身振动,提高乘坐舒适性;同时在悬架系统上装有稳定杆,用来共同抑制车身的侧倾。近年来,随着消费者对于车辆乘坐舒适性及操纵稳定性的要求越来越高,如何基于悬架系统来提高车辆的抗侧倾控制能力成了国内外学者研究的热点<sup>[1]</sup>。

目前已有部分开发设计的抗侧倾控制系统用于量产车上,例如宝马公司的主动防倾杆系统<sup>[2]</sup>、舍夫勒公司开发并用于宝马 7 系和宾利等高端车型上的主动侧倾控制系统<sup>[3]</sup>等,以上系统都对控制策略要求较高,因此大量企业和学者针对抗侧倾控制展开研究。Riofrio 等基于主动悬架使用 LQR(Linear Quadratic Regulator)算法来设计抗侧倾控制器,并通过实验验证了所设计控制策略的有效性<sup>[4]</sup>。Ghazali 等设计一种基于模型预测的抗侧倾控制器,实现在跟踪目标路径的同时防止车辆侧翻。<sup>[5]</sup>王立标设计了一种自适应反演滑模控制器,并仿真验证了该控制器可显著提高抗侧倾性能<sup>[6]</sup>。褚端峰等设计出一种双层控制器,其中上层控制器使用滑模控制计算所需侧倾力矩,下层控制器控制电流输出,进而控制磁流变阻尼器输出阻尼力,并进行控制策略的仿真验证<sup>[7]</sup>。

总体来说,对于抗侧倾控制研究虽然较多,但在集成控制方面略有不足,尤其是如何兼顾车辆乘坐舒适性和操纵稳定性是目前研究的难点。本文基于由空气悬架和电机式主动稳定杆组成的半主动悬架系统对底盘域抗侧倾控制系统进行设计,利用执行器响应速度快、可控性好的优点,选用合适的算法设计控制策略,并设计适应多工况的工作模式和切换控制策略,改善了车辆行驶的性能,通过联合仿真验证了抗侧倾控制策略的有效性,实现了集成控制的目的。

## 1 基于半主动悬架系统的车辆动力学模型

为了对车辆侧倾控制进行研究,更精确地描述车辆的运动,建立四自由度半车数学模型,如图 1 所示。图中: $m_s$ 为簧载质量; $m_{us}$ 为非簧载质量; $a_y$ 为侧向加速度; $k$ 为弹簧刚度; $C$ 为空气悬架的阻尼系数; $F_{xL}$ 、 $F_{xR}$ 为轮胎受到的纵向力; $F_{yL}$ 、 $F_{yR}$ 为轮胎受到的侧向力; $F_{zL}$ 、 $F_{zR}$ 为轮胎受到的垂向力; $\psi$ 为整车侧倾角; $\gamma$ 为整车俯仰角; $r$ 为整车横摆角速度; $\delta$ 为驱动轮转角; $a$ 、 $b$ 分别为前后轴到质心的距离; $u$ 为车速; $v$ 为侧向速度。

收稿日期:2022-09-23

作者简介:金传琦(1983—),男,山东临沂人,江苏联合职业技术学院无锡交通分院讲师。

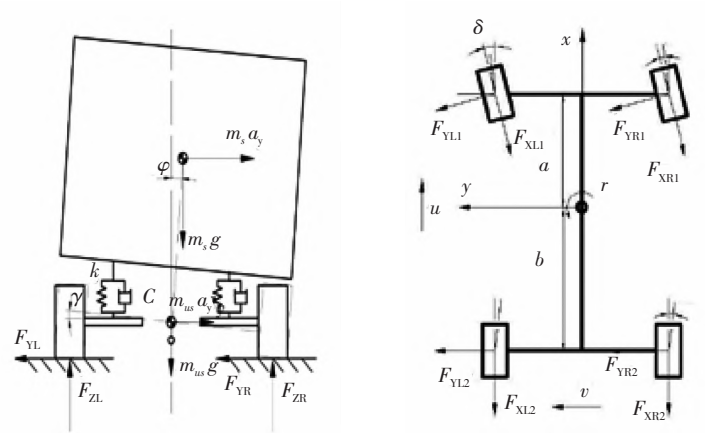


图1 四自由度半车数学模型

根据达朗贝尔原理可得整车侧向运动为:

$$ma_y = (F_{YL1} + F_{YR1}) \cos \delta + F_{YL2} + F_{YR2} \quad (1)$$

式中: $m$  为车辆总质量。

整车横摆运动为:

$$I_z \dot{r} = a(F_{YL1} + F_{YR1}) \cos \delta - b(F_{YL2} + F_{YR1}) \quad (2)$$

式中: $I_z$  为车身绕  $z$  轴的转动惯量。

整车侧倾运动为:

$$(I_x + m_s h^2) \ddot{\psi} = m_s g h \sin \psi + m_s a_y h \cos \psi - k(\psi - r) - c(\dot{\psi} - \dot{r}) \quad (3)$$

式中: $I_x$  车身为绕  $x$  轴的转动惯量; $h$  为簧载质量到侧倾中心的距离。

质心处的纵向及侧向加速度计算公式为:

$$a_x = \dot{u} - vr, a_y = \dot{v} + ur \quad (4)$$

前后车轮的侧向速度为:

$$v_f = v + ar, v_r = v - br \quad (5)$$

在某一时刻质心侧偏角  $\beta$  可由下式计算:

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{v}{u} \right) \quad (6)$$

车辆在转向过程中,轮胎会发生一定的侧偏,此时前后轮的侧偏角  $\alpha_f, \alpha_r$  为:

$$\alpha_f = \beta + \frac{ar}{u} - \delta, \alpha_r = \beta - \frac{br}{u} \quad (7)$$

由前后轮的侧偏角可计算前后轮的侧向力为:

$$F_{Yf} = -K_f \alpha_f, F_{Yr} = -K_r \alpha_r \quad (8)$$

式中: $K_f, K_r$  分别为前后轮侧倾角刚度。

通过以上各式完成整车动力学模型的建立。

## 2 底盘域系统抗侧倾控制策略设计

### 2.1 侧倾性能评价指标

为验证控制策略的优劣性,需要选择一定的参数指标作为评价指标,常用的侧倾稳定性评价指标有侧倾角、侧向加速度和横向载荷转移率 LTR(Lateral Load Transfer Ratio)<sup>[8-9]</sup>。其中 LTR 常用于辨识车辆的侧翻运动状态,其取值范围为[0, 1],该值计算方式为:

$$\text{LTR} = \left| \frac{F_L - F_R}{F_L + F_R} \right| \quad (9)$$

式中:  $F_L$ 、 $F_R$  分别为左、右侧轮胎受到的垂向载荷。

由于侧倾角和侧向加速度可通过传感器直接或间接测得,而上式中的轮胎垂向载荷无法测得,因此需要转换成车辆自身状态参数,如下式:

$$\text{LTR} = \frac{2m_s a_y h}{mgL_w} + \frac{2m_s h \tan \psi}{mL_w} \quad (10)$$

式中:  $L_w$  为轮距。

## 2.2 抗侧倾控制策略设计

车辆在行驶时由于转向或路面不平度影响导致车辆发生侧倾时,需要对车身的侧倾程度进行控制。为了兼顾车辆的舒适性和操稳性,需要定义目标侧倾角。大量试验表明,在兼顾舒适性和操稳性时,车辆的理想侧倾角和侧向加速度关系如下式<sup>[10]</sup>:

$$\psi = \begin{cases} 0.8a_y + 2.4, & a_y < -3 \text{ m/s}^2 \\ 0, & -3 \text{ m/s}^2 \leq a_y \leq 3 \text{ m/s}^2 \\ 0.8a_y - 2.4, & a_y > 3 \text{ m/s}^2 \end{cases} \quad (11)$$

为使执行器的评价指标跟踪期望指标,需分别对悬架系统中空气悬架和电机式主动稳定杆的控制策略进行设计。

空气悬架系统选用模糊控制策略,将实际侧倾角和理想侧倾角的偏差  $e$  及其变化量  $ec$  作为输入,悬架控制阻尼力作为输出,对空气悬架子控制器进行设计。定义输入参数的模糊论域分别为  $[-5, 5]$  和  $[-4, 4]$ ,输出的模糊论域为  $[-3, 3]$ ,输入输出的量化因子分别为 1、10、1 000,隶属度函数选用三角形隶属度函数,为使得系统尽快消除侧倾角误差,定义 7 个模糊子集,使用重心法解模糊化,得出控制规则表,如表 1 所示。在 Matlab/Simulink 中通过以上方法完成 Fuzzy 模块中模糊控制算法设计。

表 1 空气悬架系统模糊控制规则表

$e$	$ec$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PM	PS	PS	ZO
NM	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZO
NS	PM	PM	PM	PS	PS	ZO	ZO
ZO	PM	PS	ZO	ZO	ZO	NS	NM
PS	ZO	ZO	NS	NS	NM	NM	NM
PM	ZO	NS	NS	NM	NM	NB	NB
PB	ZO	NS	NS	NM	NB	NB	NB

电机式主动稳定杆作为一种新型主动抗侧倾结构,可以根据车辆行驶的工况实时灵活地调节悬架侧倾角刚度,控制车身的侧倾程度。电机式主动稳定杆的核心技术在于控制策略,如何实现精确控制是该技术研究的重点。本文设计双层控制器,其中上层控制器选用滑模控制策略,用于计算需要输出的反侧倾力矩大小;下层控制器是对电机输出进行控制,采用 PID(Proportional-Integral-Derivative)控制来控制电机输出相应扭矩。

首先,对上层控制器的控制策略进行设计。定义理想侧倾角与实际侧倾角误差  $e$  为滑模控制输入,主动稳定杆反侧倾力矩作为输出,定义滑模面  $s$  为:

$$s = c_1 \int edt + c_2 e + \dot{e} (c_1, c_2 > 0) \quad (12)$$

式中: $c_1$ 、 $c_2$ 为滑模控制参数。

为改善滑模控制存在的抖振,改善控制系统的稳定性,选用指数趋近律来改善系统的动态特性,指数趋近律需满足:

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - Ks (\varepsilon, K > 0) \quad (13)$$

式中: $\varepsilon$ 为滑模控制增益; $\operatorname{sgn}(s)$ 为符号函数; $K$ 为系统不确定系数。

由此可计算得到控制器需输出的反侧倾力矩大小为:

$$M_R = (m_s g h - K_\psi) \psi - C_\psi \dot{\psi} + m_s h a_y - (I_x + m_s h^2) [c_1 \dot{e} + c_2 \ddot{e} + \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + Ks] \quad (14)$$

式中: $K_\psi$ 为整车侧倾角刚度; $C_\psi$ 为整车侧倾角阻尼。

其次,对下层电机控制器进行设计。根据永磁同步电机的绕组结构及坐标变换方法建立永磁同步电机模型和电机控制策略<sup>[11]</sup>,具体来说电机控制器采用三环闭环控制方式,即外环转速环和中间环转速控制环使用PI(Proportional-Integral)控制,内环电流环采用最优控制。

### 2.3 抗侧倾工作模式切换策略设计

为满足车辆在不同工况下输出合适的反侧倾力矩,并对悬架系统的各个执行器进行合理控制和分配,需对抗侧倾控制系统工作模式切换策略进行设计。

车辆在行驶过程中发生侧倾时通常有以下工况:转向(包括紧急转向)和直线行驶时左右不平路面存在高度差。为判断当前车辆的车身姿态,通过使用侧向加速度传感器、侧倾角速度传感器、轮速传感器和方向盘转角传感器、簧载质量加速度传感器和位移传感器等来实时采集信号并输入到ECU(Electronic Control Unit)中,从而判断当前车身姿态。

具体来说,所设计的工作模式可分为以下几种:

(1)轮速传感器采集到的车速小于10 km/h。此时即使存在转向或左右轮存在高度差,主动稳定杆的优化效果较小,因此此时主动稳定杆系统的电机不通电,相当于被动稳定杆,底盘域控制器控制空气悬架系统作用,根据位移传感器和簧载质量传感器的信号来调整充放气,进而控制悬架输出合适的阻尼力。

(2)轮速传感器采集到的车速大于10 km/h。此时需详细判断当前车辆的行驶状态。当传感器采集到的侧倾角或侧向加速度的绝对值小于设定的阈值时,此时主动稳定杆不工作以减少能耗,通过空气悬架输出的阻尼力来抵抗车身的侧倾;当传感器采集到的侧倾角和侧向加速度的绝对值都大于设定的阈值时,此时主动稳定杆起主要作用,输出反侧倾力矩,若此时输出的力矩未达到控制目标,空气悬架也开始工作,输出阻尼力补充剩余力矩。在选定侧倾角和侧向加速度阈值时,仿真设置车辆在C级路面下行驶时,方向盘以幅值为10°的正弦角作为输入来模拟实际工况,得到的侧倾角和侧向加速度分别在 $[-0.6^\circ, 0.6^\circ]$ 和 $[-0.12g, 0.12g]$ 范围内,因此以0.6°和0.12g作为阈值。

(3)传感器检测到侧倾角 $|\psi| \geq 5^\circ$ 或 $|a_y| \geq 0.4g$ 。不论车速的快慢,此时车辆侧倾程度较大,有很大的侧翻风险,因此此时主动稳定杆输出最大反侧倾力矩,空气悬架也输出阻尼力作为补充,必要时需输出最大阻尼力,减少车辆的侧倾角,减小侧翻风险。

(4)控制系统发生故障。为保障车辆行驶的安全,主动稳定杆的电机应短接工作输出反侧倾力矩,同时空气悬架系统也要输出阻尼力来维持基本的隔振作用。

通过以上设计,完成底盘域抗侧倾系统工作模式切换策略设计。

### 3 抗侧倾控制策略联合仿真

为了验证以上所设计基于半主动悬架的底盘域抗侧倾控制策略的有效性,使用Matlab/Simulink软件建立控制策略模型,并与Carsim软件进行联合仿真,评估整车性能。以下分别通过不同工况下带底盘域抗侧倾控制系统车辆和普通车辆行驶时的性能对比。

(1)双移线工况。路面附着系数为0.85,车速为60 km/h,仿真得到的侧倾性能评价指标对比如图2所示。由图2可知,在双移线工况下,被动控制下车辆的侧倾角最大可达到2.2°,而使用主动抗侧倾控制的车辆侧倾角峰值为0.5°,优化效果较为明显,同时横向载荷转移率LTR也有所改善,而侧向加速度改善较小。



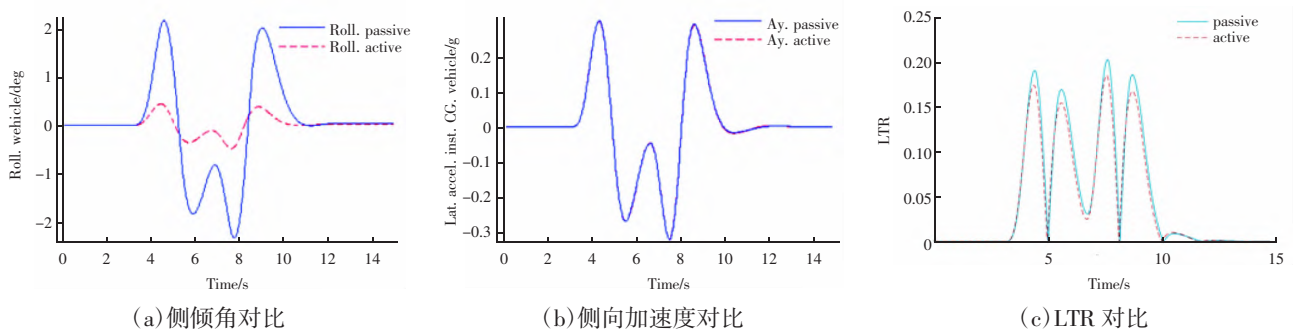


图2 双移线工况下侧倾性能评价指标对比

(2) 鱼钩工况。路面附着系数为 0.85, 车速为 80 km/h, 仿真得到的侧倾性能评价指标对比如图 3 所示。由图可知, 在鱼钩工况下, 由于该工况比较激烈, 使用主动抗侧倾控制相较于被动控制横向载荷转移率 LTR 改善较为明显, 具体来说, 被动控制下的 LTR 值最大达到 0.95, 主动抗侧倾控制的 LTR 值最大值为 0.51, 优化率为 46.32%, 且侧向加速度和侧倾角均有所改善, 验证了所设计的控制策略可以有效改善车辆行驶时的性能。

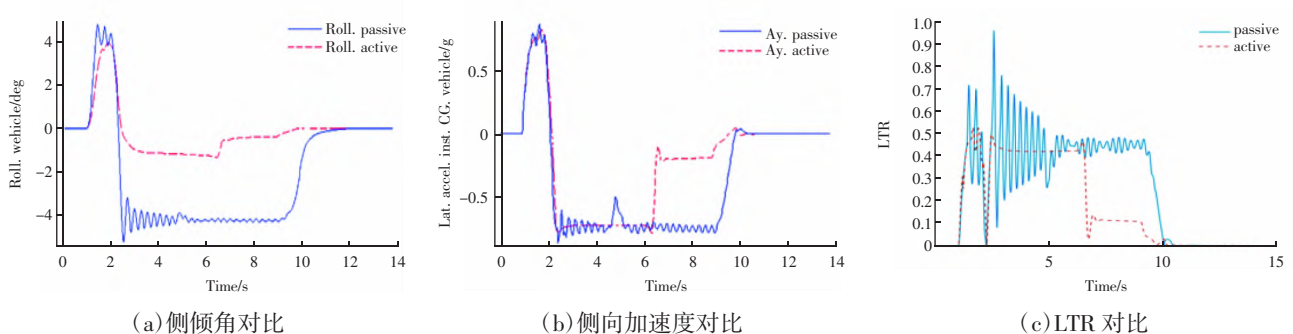


图3 鱼钩工况下侧倾性能评价指标对比

#### 4 结束语

本文通过建立车辆四自由度动力学模型, 并基于由空气悬架和电机式主动稳定杆组成的悬架系统分别设计控制策略, 使得各个执行器跟踪目标侧倾角和侧向加速度来输出需要的反侧倾力矩。为适应多工况下车辆抗侧倾能力, 设计底盘域工作模式控制策略, 并使用 Simulink 和 Carsim 软件进行联合仿真。仿真结果表明: 所设计的底盘域抗侧倾控制策略可以有效改善车辆的抗侧倾能力, 降低了侧倾角、侧向加速度和横向载荷转移率, 验证了控制策略的有效性, 实现了多执行器间的集成控制。

#### 参考文献:

- [1] TSENG H E, HROVAT D. State of the art survey: active and semi-active suspension control[J]. Vehicle System Dynamics, 2015(7): 1034-1062.
- [2] STRASSBERGER M, GULDNER J. BMW's Dynamic Drive: An active stabilizer bar system[J]. IEEE control systems, 2004(4):28-29,107.
- [3] KRAUS M, HOCHMUTH H, KREHMER H, et al. Chassis opportunities for the future-unique actuators & applications solutions made by schaeffler[J]. Romanian Journal of Automotive Engineering, 2017(4):133-148.
- [4] RIOFRIO A, SANZ S, MJL B, et al. A LQR-Based Controller with estimation of road bank for improving vehicle lateral and rollover stability via active suspension[J]. Sensors, 2017(10):2318.
- [5] GHAZALI M, DURALI M, SALARIEH H. Vehicle trajectory challenge in predictive active steeringrollover prevention[J]. International Journal of Automotive Technology, 2017(3):511-521.
- [6] 王立标. 磁阻电机式车辆横向稳定杆耦合特性及其控制研究[D]. 上海: 东华大学, 2021.

- [7]褚端峰,李刚炎.半主动悬架汽车防侧翻控制的研究[J].汽车工程,2012(5):399-402,432.
- [8]姚嘉凌,任杉,李智宏,等.基于半主动悬架侧倾力矩分配的侧向稳定性控制[J].汽车工程,2016(8):974-980,988.
- [9]高攀,陈世兴,邹胤,等.车辆侧翻稳定性研究现状与对策[J].汽车文摘,2022(7):5-12.
- [10]SORNIOTTI A. Electro-mechanical active roll control:A new solution for active suspensions[J]. Sensor Letters, 2006(11):2114-2116.
- [11]代金龙.电机式横向稳定杆的新能源汽车防侧倾控制研究[D].杭州:浙江科技学院,2022.

(责任编辑:张 利)

## Study on Anti-Sway Control of Vehicles Based on Semi-Active Suspension

JIN Chuan-qi

(Wuxi Transportation Branch, Jiangsu Union Technical Institute, Wuxi 214151, China)

**Abstract:** The suspension system can serve to improve the ride comfort and be used to suppress vehicle's body roll. Based on the demand of anti-roll control under multiple working conditions of the vehicle, it establishes a four-level free dynamics model of a vehicle with a semi-active suspension system. Air suspension and motorized active stabilizer bar are used as actuators, and fuzzy control and sliding mode control are selected to design the anti-roll controller respectively. The effectiveness of the designed control strategy is verified by a joint simulation model with Matlab/Simulink and Carsim. The simulation results show that the semi-active suspension system with active lateral stabilizer bar can effectively reduce vehicle roll angles and the risk of vehicle rollover under double shift and fishhook conditions.

**Key words:** semi-active suspension; air suspension; active stabilizer bar; chassis domain; anti-roll control

### 本刊声明

为了适应我国信息化建设的需要,扩大本刊及作者知识信息交流渠道,实现期刊编辑、出版工作的网络化,本刊已加入《中国期刊网》《中国学术期刊(光盘版)》全文数据库、《万方数据——数字化期刊群》和《中国科技期刊数据库》。本刊录用的文章,在上述数据库中的著作权使用费,已包含在本刊稿酬内一次性给付,不再另付。如作者不同意,请在来稿时特别声明,本刊将作适当处理。

《江苏航运职业技术学院学报》编辑部