

# 四轮轮毂电机电动车横摆力矩 参数自调整模糊控制

李刚, 韩海兰

(辽宁工业大学 汽车与交通工程学院, 辽宁 锦州 121001)

**摘要:** 针对四轮轮毂电机电动车横摆力矩控制问题,进行横摆力矩参数自调整模糊控制研究,确定整车横摆力矩分层控制结构.基于参数自调整模糊控制理论设计附加横摆力矩决策控制器.利用四轮驱动力矩独立可控的优势,采用规则分配方法进行四轮驱动力分配,并通过 CarSim 与 Matlab/Simulink 联合仿真实验,选取连续正弦方向盘转角输入工况对控制方法进行验证.结果表明:四轮轮毂电机横摆力矩参数自调整模糊控制方法能够有效提高车辆行驶稳定性.

**关键词:** 四轮轮毂; 电机电动车; 横摆力矩; 参数自调整; 规则分配; 行驶稳定性

**中图分类号:** TP 391.9      **文献标志码:** A

汽车电子稳定性控制系统(ESC)是车辆重要的主动安全控制系统,而直接横摆力矩控制(DYC)是该系统的重要组成部分.传统内燃机汽车横摆力矩控制主要采用车轮差动制动方式实现<sup>[1-3]</sup>,而四轮轮毂电机电动车四轮驱动力矩独立可控,在汽车横摆力矩控制方面可以通过四轮驱动力控制实现.由于电机响应速度比液压响应速度快,转矩转速易于测得,因此,通过对四轮驱动力合理分配,四轮轮毂电机电动车驱动横摆力矩控制能够更好提高行驶稳定性和乘坐舒适性<sup>[4-5]</sup>.目前,汽车横摆力矩控制方法有滑模控制<sup>[1]</sup>、最优控制<sup>[2]</sup>、模糊控制<sup>[6]</sup>和神经网络控制<sup>[7]</sup>等方法.其中,模糊控制具有不依赖控制对象、鲁棒性强等优点,在汽车横摆力矩控制中应用广泛.但传统模糊控制方法存在控制器规则不可变、不能适用各种工况的问题,因此,近些年来发展了自适应模糊控制<sup>[8]</sup>,这一理论已在机械、电气等领域进行了应用性研究<sup>[9-11]</sup>.本文基于参数自调整自适应模糊控制理论,研究了四轮轮毂电机电动车横摆力矩控制.

## 1 横摆力矩控制结构

图 1 为横摆力矩控制采用分层控制结构,包括信号处理层、横摆力矩决策层、控制分配层和执行层 4 部分.信号处理层中的参考模型为二自由度车辆模型,参考模型根据驾驶员的方向盘转角输入和车速计算出横摆角速度期望值;横摆力矩决策层根据车辆实际的横摆角速度值和参考模型,计算出横摆角速度期望值,通过参数自调整模糊控制决策,实现汽车稳定性控制所需的附加横摆力矩.控制分配层根据总的目标驱动力矩和所需的附加横摆力矩,合理分配四轮驱动力;执行层通过输出的四轮轮毂电机,实现 4 个车轮的驱动力矩,完成控制.

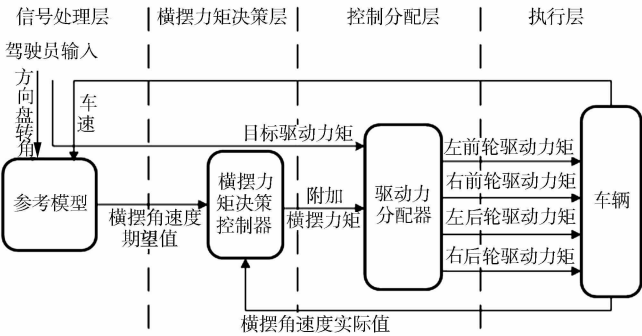


图 1 横摆力矩控制结构  
Fig. 1 Yaw moment control structure

2 横摆力矩决策控制器设计

2.1 参考模型

二自由度车辆模型<sup>[12]</sup>运动响应能够较好地反映车辆稳定行驶状态,而且具有实时性好的特点,因此,控制系统多选用线性二自由度模型作为参考模型<sup>[13]</sup>.根据整车基本参数建立线性二自由度模型,将其横摆角速度值响应输出作为期望值进行控制.线性二自由度模型的横摆角速度值可表示为

$$\gamma_d = \frac{v_x/L}{1 + Kv_x^2}\delta.$$

(1)

式(1)中: $K = \frac{m}{L^2} \cdot (\frac{a}{k_2} - \frac{b}{k_1})$ , $a, b$ 分别为汽车质心至前、后轴的距离, $k_1, k_2$ 分别为汽车前、后轴的侧偏刚度; $v_x$ 为汽车纵向速度; $\delta$ 为驾驶员通过方向盘给汽车的前轮转角输入值.

考虑到路面附着条件,当轮胎达到附着极限时,此时线性二自由度参考模型稳态响应需要由边界值取代.横摆角速度边界值<sup>[13]</sup>为

$$\gamma_{bound} = 0.85 \mu g / v_x.$$

式中: $\mu$ 为路面附着系数; $g$ 为重力加速度.

2.2 参数自调整模糊控制器设计

由于汽车行驶环境复杂,传统模糊控制器规则固定,很难适应所有工况,因此,设计了横摆力矩决策参数自调整模糊控制器,其结构图如 2 所示.

参数自调整模糊控制器由基本模糊控制器和参数自调整模块两部分组成.模糊控制器的核心在于模糊控制规则的设计. $e, \dot{A}$ 分别为横摆角速度实际值 $\gamma$ 与期望值 $\gamma_d$ 的误差、误差的变化率,附加的横摆力矩值为 $\Delta M$ ,量化因子和比例因子的调节值为 $N$ .合理设计两个模块模糊规则,使参数自调整模糊控制器通过调节量化因子 $K_e, K_A$ 和比例因子 $K_u$ 在线自动调整,从而较好解决单一模糊控制器对各种工况适用性较差的问题.

2.2.1 基本模糊控制器设计 经过反复试验,横摆角速度的误差变化范围为 $[-8, 8]$ ,误差变化率为 $[-20, 20]$ ,设定的量化因子都为 1.因此,其论域分别为 $[-8, 8]$ 和 $[-20, 20]$ ,附加横摆力矩的模糊论域为 $[-52, 52]$ .为了保证控制的精度,使其在变化工况下都能很好地跟踪控制,最终将误差分为 9 个等级,模糊集为 $\{NVB, NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB, PVB\}$ ;将误差变化率分为 7 个等级,模糊集为 $\{NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB\}$ ;输出的附加横摆力矩分为 9 个等级,分别为 $\{NVB, NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB, PVB\}$ ;隶属函数均选用三角形隶属函数,如图 3~5 所示.

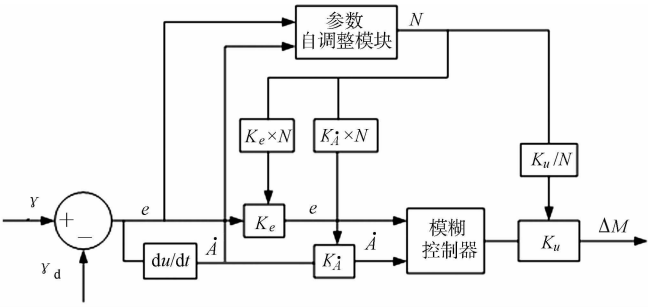


图 2 参数自调整模糊控制器结构

Fig. 2 Parameter self-regulation fuzzy controller structure

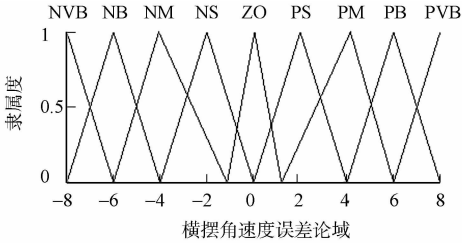


图 3 基本模糊控制器 e 的隶属函数

Fig. 3 Membership functions of e in basic fuzzy controller

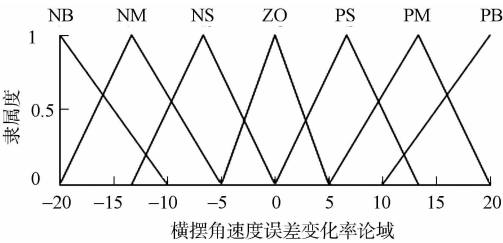


图 4 基本模糊控制器  $\dot{A}$  的隶属函数

Fig. 4 Membership functions of  $\dot{A}$  in basic fuzzy controller

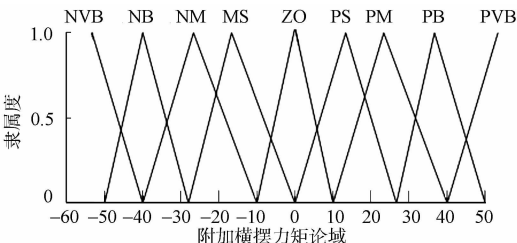


图 5 隶属函数

Fig. 5 Membership functions

当  $e$  为正时,应为车辆施加一个正的横摆力矩以跟踪期望的横摆角速度;当  $e$  为负时,应为车辆施加一个负的横摆力矩,模糊控制规则,如表 1 所示.

表 1 基本模糊控制器的模糊控制规则

Tab. 1 Fuzzy control rules of basic fuzzy controller

2.2.2 参数自调整模块设计 参数自调整模块仍采用模糊控制,根据量化因子  $K_e, K_A$  和比例因子  $K_u$  对控制性能的影响,可得到如下调整规则:当  $e$  和  $\dot{A}$  较大时,需附加较大的横摆力矩.

A	e								
	NVB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PVB
NB	NVB	NVB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	PS
NM	NVB	NVB	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	PM
NS	NVB	NVB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ZO	NVB	NB	NM	NM	ZO	PS	PM	PB	PVB
PS	NVB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PVB
PM	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PVB	PVB
PB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PVB	PVB

为使车辆迅速做出响应,应降低量化因子来减小对输入量的分辨率,同时加大比例因子,从而可以获得较大的横摆力矩输出,使响应速度加快.当  $e$  和  $\dot{A}$  较小时,汽车已经接近稳定状态,需要附加的横摆力矩值较小,为了提高控制精度,要增大量化因子,提高对输入变化的分辨率.同时,减小输出比例因子,防止超调或振荡,提高控制的稳态精度<sup>[14]</sup>.

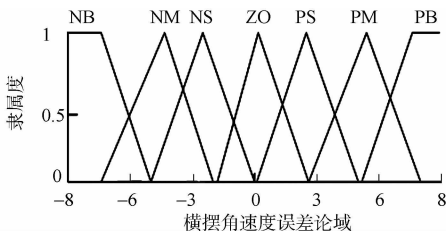


图 6 参数自调整模块中  $e$  的隶属函数

Fig. 6 Membership functions of  $e$  in parameter self-regulation module

根据以上参数调整的原则,设计了一个模糊参数调整器.输入变量为  $e$  和  $\dot{A}$ ,输出变量为量化因子  $K_e, K_A$  的增大倍数为  $N$  (等于比例因子  $K_u$  缩小倍数).  $N$  的论域定为  $[0.5, 1.5]$ ;模糊子集分为  $\{CH$  (高缩),  $CL$  (低缩),  $AL$  (低放),  $AH$  (高放) $\}$ ,其隶属函数,如图 6~8 所示.控制规则,如表 2 所示.

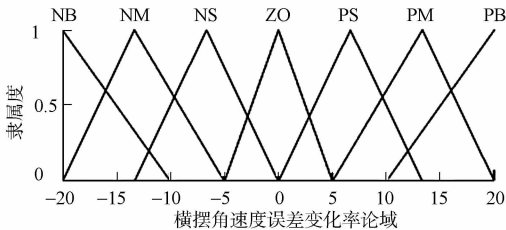


图 7 参数自调整模块中  $\dot{A}$  的隶属函数

Fig. 7 Membership functions of  $\dot{A}$  in parameter self-regulation module

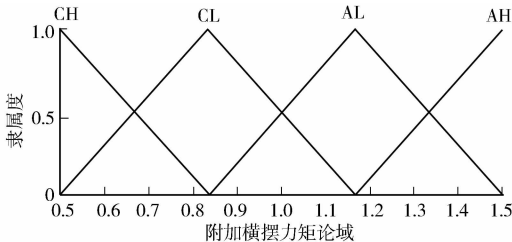


图 8 隶属函数

Fig. 8 Membership functions

3 驱动力分配器的设计

横摆力矩决策层所计算出的附加横摆力矩最终需要通过驱动力分配实现.四轮轮毂电机电动汽车四轮驱动力可通过控制各轮轮毂电机转矩实现,即

$$T_{x,i} = F_{x,i} \cdot r_i. \tag{2}$$

式(2)中: $F_{x,i}$ 为各车轮驱动力; $T_{x,i}$ 为各轮驱动力矩; $r_i$ 为车轮半径, $i=1,2,3,4$ ,分别代表左前轮、右前轮、左后和右后轮.

当车辆直线行驶时,四轮驱动力相等,设为  $F$ .当车辆转弯时,附加横摆力矩通过左右侧车轮驱动力规则分配实现,为了提高车轮的稳定裕度,前后轴各产生所需附加横摆力矩的  $1/2$ .根据附加横摆力矩符号,对车辆状态进行判断.当车辆处于左转转向不足或右转转向过度时,适当增大右侧车轮驱动力矩,减小左侧车轮驱动力矩,使每个车轮产生正的  $1/4$  附加横摆力矩;当车辆处于右转转向不足或左转转向

表 2 参数自调整模块中的模糊控制规则

Tab. 2 Fuzzy control rules of parameter-self-tuning module

A	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	CH	CH	CH	CH	CH	CH	CH
NM	CH	CH	CL	CL	CL	CH	CH
NS	CL	AL	AL	AL	AL	AL	CL
ZO	AL	AH	AH	AH	AH	AH	AL
PS	CL	AL	AL	AL	AL	AL	CL
PM	CH	CH	CL	CL	CL	CH	CH
PB	CH	CH	CH	CH	CH	CH	CH

过度时,适当增大左侧车轮驱动力矩,减小右侧车轮驱动力矩,使每个车轮产生负的  $1/4$  附加横摆力矩.同时,保证了四轮驱动力矩之和为驾驶员所需的总的目标驱动力矩.具体的分配规则为:当附加横摆力矩  $\Delta M=0$  时,车辆直线行驶,有

$$F_{x,1} = F_{x,2} = F_{x,3} = F_{x,4} = F.$$

当附加横摆力矩  $\Delta M>0$  时,车辆左转转向不足或右转向过度,为了纠正车辆状态,令

$$\left. \begin{aligned} T_{x,1} &= F_{x,1} \times r_1 - \frac{1}{4} \times |\Delta M| / (B/2), & T_{x,2} &= F_{x,2} \times r_2 + \frac{1}{4} \times |\Delta M| / (B/2), \\ T_{x,3} &= F_{x,3} \times r_3 - \frac{1}{4} \times |\Delta M| / (B/2), & T_{x,4} &= F_{x,4} \times r_4 + \frac{1}{4} \times |\Delta M| / (B/2), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

当附加横摆力矩  $\Delta M<0$  时,当车辆右转向不足或左转向过度时,为了纠正车辆状态,令

$$\left. \begin{aligned} T_{x,1} &= F_{x,1} \times r_1 + \frac{1}{4} \times |\Delta M| / (B/2), & T_{x,2} &= F_{x,2} \times r_2 - \frac{1}{4} \times |\Delta M| / (B/2), \\ T_{x,3} &= F_{x,3} \times r_3 + \frac{1}{4} \times |\Delta M| / (B/2), & T_{x,4} &= F_{x,4} \times r_4 - \frac{1}{4} \times |\Delta M| / (B/2), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$T_{x,1} + T_{x,2} + T_{x,3} + T_{x,4} = T_{x,req}. \quad (5)$$

式中:  $T_{x,1}, T_{x,2}, T_{x,3}, T_{x,4}$  分别表示左前、右前、左后、右后车轮的驱动力矩;  $\Delta M$  为总的附加横摆力矩;  $B$  为前后轴距;  $T_{x,req}$  为目标驱动力矩.

4 仿真试验验证

为了验证控制方法的有效性,进行 CarSim 与 Matlab/Simulink 联合仿真实验验证. 首先在 CarSim 中设置车辆模型参数,其中:整车质量  $m$  为 1 331 kg;簧载质量  $m_s$  为 1 111 kg;汽车质心距前轴的距离  $a$  为 1.04 m;距后轴的距离  $b$  为 1.56 m;距地面的距离  $h$  为 0.54 m;汽车前轮的轮距为 1.481 m;后轮的轮距为 1.486 m;汽车绕坐标轴  $Z$  轴的转动惯量为 2.314.

将 CarSim 中传统内燃机模型修改为四轮独立驱动电动车模型,应用 Matlab/Simulink 编写控制算法程序,搭建控制模块,在数学模型求解部分将 CarSim 和 Matlab/Simulink 进行联合仿真计算. 在 CarSim 中设置连续正弦方向盘转角,输入工况,对控制方法进行验证,实验结果在后处理部分显示.

当车速为  $75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,路面附着系数为 0.4 时,方向盘转角( $\delta$ )曲线,如图 9 所示.连续正弦方向盘转角输入工况仿真结果如图 10~16 所示.

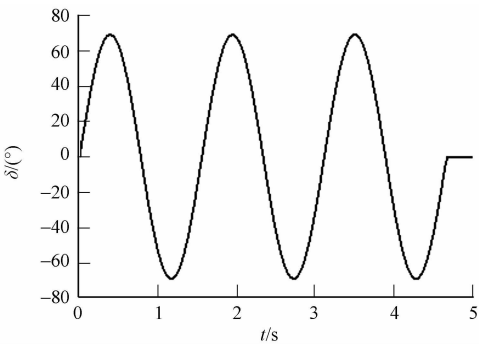


图 9 方向盘转角曲线

Fig. 9 Curve of steering wheel angle

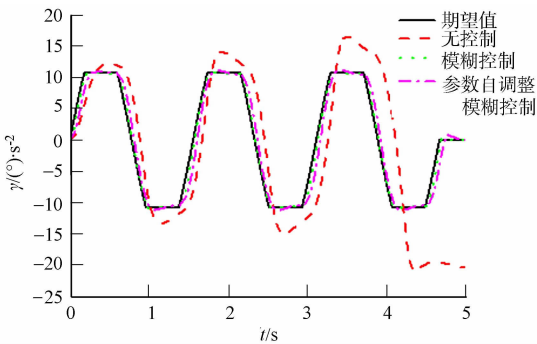


图 10 横摆角速度对比曲线

Fig. 10 Contrast curves of yaw rate

由图 10~13 可知:无控制时,在第 4~5 s,汽车出现了严重侧滑,而控制后汽车能够保持良好的行驶稳定性,没有出现侧滑.

由图 10 可知:汽车无控制时横摆角速度明显大于有控制时横摆角速度,且在第 4~5 s 急剧增大,而控制后参数自调整模糊控制和模糊控制都能控制汽车横摆角速度较好地跟踪期望值.

由图 11 可知:无控制时,质心侧偏角相对于有控制时质心侧偏角( $\beta$ )较大,且在第 4~5 s 时急剧增大,而控制后,汽车质心侧偏角较小,汽车保持稳定行驶.

由图 12 可知:参数自调整模糊控制汽车质心侧偏角整体明显小于模糊控制,说明参数自调整模糊

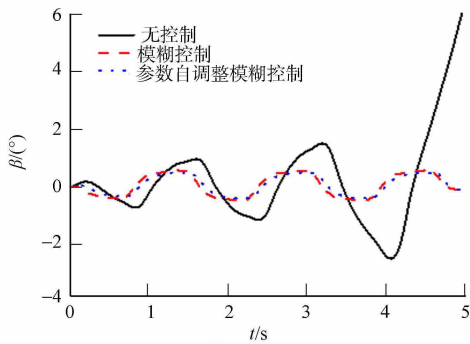


图 11 质心侧偏角曲线

Fig. 11 Curves of side-slip angle

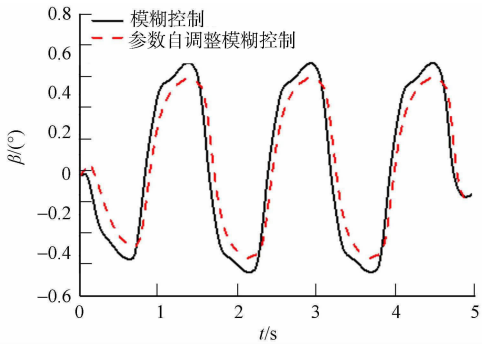


图 12 质心侧偏角对比曲线

Fig. 12 Contrast curves of side-slip angle

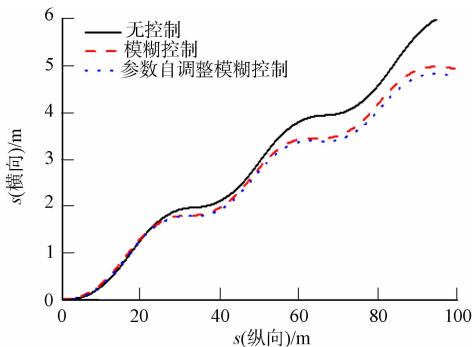


图 13 行驶轨迹对比曲线

Fig. 13 Contrast curves of running track

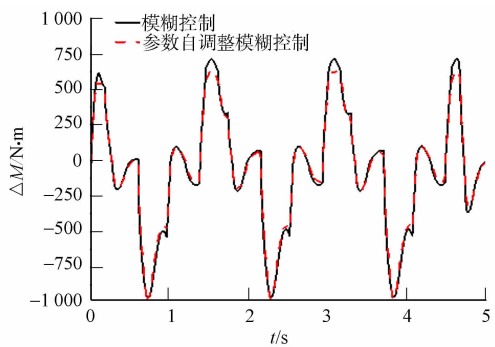


图 14 附加横摆力矩对比曲线

Fig. 14 Contrast curves of additional yaw moment

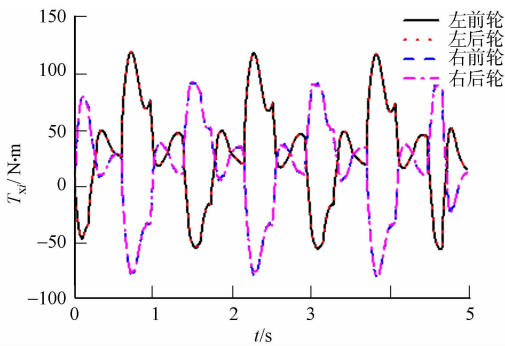


图 15 模糊控制四轮驱动力矩曲线

Fig. 15 Curves of four-wheel driving torque by fuzzy control

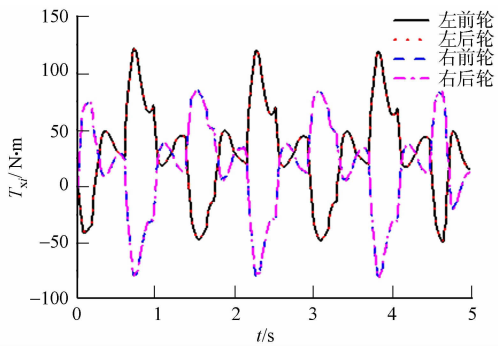


图 16 参数自调整模糊控制四轮驱动力矩曲线

Fig. 16 Curves of four-wheel driving torques by parameter self-regulation fuzzy control

控制后汽车的稳定性要优于模糊控制.

由图 13 可知:有控制时,汽车行驶轨迹侧向位移变化要小于无控制,汽车纵向位移 80~100 m 时,无控制相对于有控制出现了较大侧向位移变化,即汽车出现了较大侧滑,与前面分析结果一致.

由图 14 可知:两种控制方法对应附加横摆力矩的变化.

由图 15,16 可知:四轮驱动力矩变化与附加横摆力矩变化趋势相同.

## 5 结论

1) 根据四轮轮毂电机电动汽车四轮驱动力矩独立可控的优势,基于参数自调整模糊控制理论,设计了附加横摆力矩决策控制器,实现在线对模糊控制器参数的自调整,并通过四轮驱动力规则分配实现附加横摆力矩控制.

2) CarSim 与 Matlab/Simulink 联合仿真实验表明:横摆力矩参数自整定模糊控制相对于汽车无控制和横摆力矩模糊控制,提高了汽车行驶稳定性.

参考文献：

[1] 王伟达,张为,丁能跟. 汽车 DYC 系统的二阶滑膜控制[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2011,39(1):141-151.

[2] 杨建森. 面向主动安全的汽车底盘集成控制策略研究[D]. 长春:吉林大学,2012:39-58.

[3] 徐中明,于海兴,贺岩松. SUV 车辆差动制动防侧翻控制研究[J]. 汽车工程,2014,36(5):566-572.

[4] RAUH J,AMMON D. System dynamics of electrified vehicles: Some facts, thoughts, and challenges[J]. Vehicle System Dynamics,2011,49(7):1005-1020.

[5] 余卓平,冯源,熊璐. 分布式驱动电动汽车动力学控制发展现状综述[J]. 机械工程学报,2013,49(8):105-114.

[6] TAHAMI F,FARHANGI S,KAZEMI R. A Fuzzy logic direct yaw-moment control system for all-wheel-drive electric vehicles[J]. Vehicle System Dynamics,2004,41(3):203-221.

[7] 高利,李剑锋. 一种车辆主动横摆力矩的神经网络控制方法[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2007,28(1):17-20.

[8] 石如冬. 自适应模糊控制算法研究及其实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008:10-42.

[9] 王斌,邱志成,张宪民. 气动驱动柔性臂自适应模糊振动控制[J]. 机械工程学报,2013,49(11):50-60.

[10] 陈进,宁小波,李耀明. 联合收获机前进速度的模型参考模糊自适应控制系统[J]. 农业机械学报,2014,23(10):87-91.

[11] 雷金莉,窦满峰. 基于损耗分析的高空电机效率模糊自适应优化控制[J]. 中南大学学报:自然科学版,2014,45(3):742-747.

[12] 余志生. 汽车理论[M]. 5 版. 北京:机械工业出版社,2012:144-159.

[13] RAJAMANI R. Vehicle dynamics and control [M]. New York:Springer,2006:61-69.

[14] 曾光奇,胡均安. 模糊控制理论与工程应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2006:39-62.

Yaw Moment Control for Motor Electric Vehicle with Four-Wheel Hub  
Based on Parameter Self-Regulation Fuzzy Control

LI Gang, HAN Hai-lan

((College of Automobile and Transportation Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

**Abstract:** For the yaw moment control of motor electric vehicle with four-wheel motor, the parameter self-regulation fuzzy control theory is studied in this paper. And the yaw moment hierarchical control structure of the vehicle is determined. The additional yaw moment decision-making controller is designed based on parameter self-regulation adaptive fuzzy control theory. Taking advantage of the independent control of the four-wheel driving torque, rule allocation method is used for four-wheel driving forces distribution. Using CarSim and Matlab/Simulink co-simulation test, the control method is verified by selecting the input mode of the continuous sine steering wheel angle. The results show that the yaw moment based on parameter self-regulation fuzzy control method can improve vehicle driving stability effectively.

**Keywords:** four-wheel hub; motor; electric vehicle; yaw moment; parameter self-regulation fuzzy; rule allocation; driving stability

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 杨建红)