

# 四轮独立驱动电动汽车四轮转向和横摆力矩联合控制仿真

徐 坤, 王云超, 沈 建

(集美大学机械与能源工程学院, 福建 厦门 361021)

**[摘要]** 为了提升四轮独立驱动电动汽车低速机动性和高速稳定性, 提出四轮转向和横摆力矩联合控制策略。针对普通模糊控制器参数和控制规则固定、自适应能力差等缺陷, 利用自校正模糊控制器进行模糊控制参数在线修正, 建立 Matlab/Simulink 与 CarSim 联合仿真模型, 并针对低速急剧双移线工况和高速连续正弦工况, 进行了仿真分析, 对比了无控制、有参数自校正模糊控制和无参数自校正模糊控制三种控制策略。结果表明: 基于参数自校正模糊控制的四轮转向和横摆力矩联合控制策略有效提高了低速机动性和高速稳定性。

**[关键词]** 四轮转向; 横摆力矩控制; 参数自校正模糊控制; 四轮独立驱动; 电动汽车

**[中图分类号]** U 461.6

## Integrative Control Simulation of Four-wheel Steering and Yaw Moment Control of Four-wheel Independent Drive Electrical Vehicle

XU Kun, WANG Yunchao, SHEN Jian

(School of Mechanical and Energy Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** To enhance mobility at low vehicle speed and stability at high vehicle speed for four-wheel independent drive electric vehicle, a control strategy combined with four-wheel steering and yaw moment has been proposed. To overcome the disadvantages of the traditional fuzzy controller, which contains fixed parameters and control rules, low adaptive ability and etc, an online parameter self-adjusting fuzzy controller was developed. Under conditions of sharp double lane change at low speed and continuous sinusoidal at high speed, an analysis was carried out by the co-simulation model built by the Matlab/Simulink and CarSim software. The comparison among the three control strategies, which are the no control, the parameter self-adjusting fuzzy control and the parameter self-adjusting fuzzy control, show that the mobility at low vehicle speed and the stability at high vehicle speed have obviously been improved for the parameter self-adjusting fuzzy control strategy.

**Keywords:** four-wheel-steering; yaw moment control; parameter self-adjusting fuzzy control; four-wheel-independent-drive; electric vehicle

## 0 引言

四轮独立驱动电动汽车是一类将驱动装置安装在车轮里或车轮附近的新能源汽车, 由于其各个车轮具有独立可控的特点, 因此为车辆操纵稳定性控制带来了较大优势。针对四轮独立驱动电动汽车的

[收稿日期] 2017-09-15

[修回日期] 2017-12-19

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51575233); 集美大学优秀青年骨干教师基金(2011B001)

[作者简介] 徐坤(1991—), 男, 硕士生, 从事新能源汽车控制系统开发研究。通信作者: 王云超(1976—), 男, 教授, 博士, 从事多轴转向及虚拟样机技术研究。

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

特点, 直接横摆力矩控制 (direct yaw moment control, DYC) 成为该领域研究的热点, 其解决了轮胎侧向力接近附着极限或达到饱和状态时, 车辆丧失动力学稳定性的问题<sup>[1]</sup>。同时, 由于四轮转向 (four-wheel-steering, 4WS) 技术可以在低速时有效减少转弯半径, 是改善汽车操纵稳定性及提高行驶安全性的常用有效的主动底盘控制技术<sup>[2]</sup>, 四轮转向和直接横摆力矩联合控制成为一个重要的研究方向。国内外学者分别利用最优控制<sup>[3]</sup>、鲁棒控制<sup>[4]</sup>、滑模控制<sup>[5]</sup>等进行四轮转向和横摆力矩联合控制方面的研究, 获得了较好的集成效果。模糊控制具有不依赖被控对象精确数学模型的特点, 可用于难以精确建模的非线性系统的控制, 近年来在汽车控制领域被广泛运用。文献 [6] 使用模糊控制器对转向系统和直接横摆力矩系统进行协调, 仿真表明, 车辆车身质心侧偏角减少的同时, 还可以跟踪目标横摆角速度。文献 [7-8] 均使用模糊控制方法研究四轮转向和横摆力矩联合控制, 结果表明, 联合控制提高了车辆的稳定性和安全性。但以上方法忽略了普通模糊控制器参数和控制规则固定, 自适应能力差的缺陷<sup>[9]</sup>。本文利用参数自校正模糊控制器在线修正模糊控制参数, 进行四轮转向和横摆力矩联合控制研究, 并通过 Matlab/Simulink 与 CarSim 联合仿真实验对控制策略进行仿真验证。

## 1 四轮转向和横摆力矩联合控制框图

图 1 为本文设计的联合控制框图, 包括参考模型、4WS 模糊控制模块、DYC 模糊控制模块、力矩分配模块及 CarSim 整车模型。为使整车获得理想的转向特性, 参考模型使用线性二自由度模型, 根据车速和前轮转角  $\delta_f$  计算出车辆稳定性控制所需的期望横摆角速度值  $\gamma_d$  和期望质心侧偏角  $\beta_d$ ; 通过 4WS 模糊控制和 DYC 模糊控制模块分别计算出后轮转角  $\delta_r$  和附加横摆力矩  $M$ ; 根据总的目标驱动力矩  $T$  和附加横摆力矩  $M$ , 经力矩分配模块合理分配四轮驱动力矩给四个轮毂电机, 实现车辆驱动。

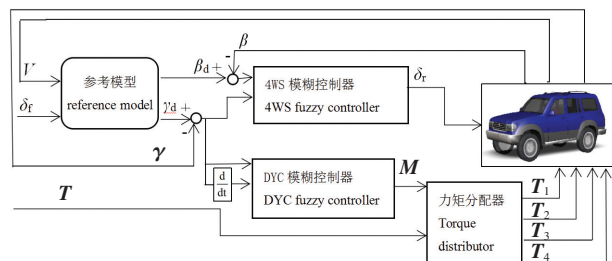


图 1 四轮转向和横摆力矩联合控制框图

Fig.1 Diagram of 4WS and DYC combination control

## 2 四轮转向和横摆力矩联合控制系统设计

### 2.1 参考模型

线性二自由度模型能够较好反映车辆稳定行驶状态, 且避免了传统四轮转向控制带来的驾驶操纵困难<sup>[10]</sup>。本文采用二自由度模型作为参考模型, 将其理想横摆角速度和质心侧偏角输出作为车辆稳定状态与轨迹跟踪的期望值, 线性二自由度模型理想横摆角速度响应<sup>[11]</sup>为

$$\gamma_d = \min \{ |(u/L) \delta_f / (1 + ku^2)|, |0.85 \cdot \mu g / u| \} \text{sign}(\delta_f),$$

$$k = (m/L^2) - ((a/k_2)(-b/k_1)).$$

式中:  $u$  为车辆质心速度沿纵向分量;  $L$  为轴距;  $k$  为稳定性因数;  $\mu$  为路面附着系数;  $a$  和  $b$  分别为车辆质心到前轴和后轴的距离;  $k_1$  和  $k_2$  分别为前后轮侧偏刚度。

通常情况下车辆质心侧偏角越小越好, 本文取期望质心侧偏角  $\beta_d$  为 0。

### 2.2 模糊控制模块设计

模糊控制结构主要包括: 变量模糊化、模糊推理、去模糊化。本文采用两个模糊控制模块分别进行四轮转向和横摆力矩控制。由于模糊控制模块参数和控制规则固定, 自适应能力差。因此, 本文采用了参数自校正模糊控制器在线修正模糊控制参数。

四轮转向模糊控制模块采用横摆角速度期望值和横摆角速度反馈值的差值  $e(\gamma)$ , 以及质心侧偏角期望值和质心侧偏角反馈值的差值  $e(\beta)$  作为控制器的输入, 后轮转角  $\delta_r$  为控制输出, 设定横摆角速度差值  $e(\gamma)$  论域为  $[-1, 1]$ , 量化因子  $k_e$  为 1, 将差值  $e(\gamma)$  的输出论域分为 7 个模糊集: {NB,

NM, NS, Z, PS, PM, PB} ; 设定质心侧偏角差值  $e(\beta)$  的论域为  $[-3, 3]$  , 量化因子  $k_b$  为 1, 将  $e(\beta)$  的输出论域分为 7 个模糊集: {NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB} ; 设定后轮转角的论域为  $[-3, 3]$  , 比例因子  $k_u$  为 1, 模糊集为: {NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB} , 均采用三角形函数为输入输出的隶属函数。模糊规则如表 1 所示。

横摆力矩模糊控制模块采用横摆角速度差值  $e(\gamma)$  及其差值变化率  $ec(\gamma)$  作为控制器的输入, 附加横摆力矩  $M$  作为控制器输出, 横摆角速度差值  $e(\gamma)$  论域为  $[-1, 1]$  , 设定其量化因子  $k_e$  为 1。

将差值分为 7 个模糊集: {NVB, NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB, PVB} 。设定横摆角速度差值变化率  $ec(\gamma)$  的论域为  $[-60, 60]$  , 量化因子  $k_{ec}$  为 1, 模糊集为: {NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB} ; 设定附加横摆力矩  $M$  的论域为  $[-1, 1]$  , 比例因子  $k_v$  为 1, 模糊集为: {NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB} 。采用三角形函数为输入输出的隶属函数, 经过反复调试后建立了如表 2 所示模糊规则表。

表 1 四轮转向模糊控制模块模糊规则

Tab.1 Fuzzy rules of 4WS fuzzy control model

$e(\beta)$	$e(\gamma)$						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PB	PB	PM	PS	Z	NM	NB	NB
PM	PB	PM	PS	Z	NM	NB	NB
PS	PB	PM	PS	Z	NM	NB	NB
Z	PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB
NS	PB	PB	PM	Z	NS	NM	NB
NM	PB	PB	PM	Z	NS	NM	NB
NB	PB	PB	PM	Z	NS	NM	NB

表 2 横摆力矩模糊控制模块模糊规则

Tab.2 Fuzzy rules of DYC fuzzy control model

$ec(\gamma)$	$e(\gamma)$								
	NVB	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PVB
PB	NS	Z	PS	PS	PM	PM	PB	PVB	PVB
PM	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PB	PVB	PVB
PS	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PVB	PVB
Z	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB
NS	NVB	NB	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NM	NVB	NVB	NB	NM	NS	NS	Z	PS	PM
NB	NVB	NVB	NB	NM	NM	NS	NS	Z	PS

### 2.3 参数自校正模糊控制器设计

一般参数自校正模糊控制器的控制结构如图 2 所示。在常规模糊控制器中量化因子和比例因子都是固定的, 当出现较大误差时, 动态响应速度受到限制, 对于各种工况的适应性较差。为了改善系统性能, 提高系统的自适应能力, 在线实时修正量化因子和比例因子, 本文针对四轮转向模糊控制器和横摆力矩模糊控制器设计了相同的参数自校正模块。

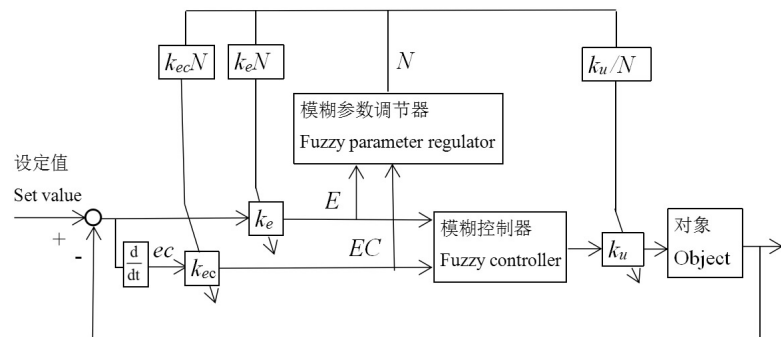


图 2 参数自校正模糊控制器控制结构

Fig.2 Control scheme for parameter self-adjusting fuzzy controllers

对于四轮转向参数自校正模块, 输入变量为  $e(\gamma)$  和  $e(\beta)$  , 输出变量为量化因子  $k_e$  和  $k_b$  的增减倍数  $N_1$  (即比例因子  $k_u$  的增减倍数)。设定  $N_1$  的论域为 {0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8} , 模糊集定义为 {CH (高缩)、CM (中缩)、CL (低缩)、Z (不变)、AL (低放)、AM (中放)、AH (高放)}。当  $e(\gamma)$  和  $e(\beta)$  值较大时应尽快消除误差, 即通过减小  $k_e$  和  $k_b$  , 来降低对输入量的分辨率, 同时增大比例因子  $k_u$  , 加快响应速度。当输入  $e(\gamma)$  和  $e(\beta)$  较小时, 系统接近稳态, 通过提高量化因子和降低比例因子来提高系统精度, 减少超调量<sup>[12]</sup>。横摆力矩参数自校正模块也采用同样方法, 其输入变量为  $e(\gamma)$  和  $ec(\gamma)$  , 输出变量为量化因子  $k_e$  和  $k_{ec}$  的增减倍数  $N_2$ 。  $N_2$  的论域和模糊集定义与  $N_1$  相同, 两个参数自校正模块的模糊控制规则如表 3 所示。

### 2.4 力矩分配模块设计

力矩分配模块将车辆总的目标驱动力矩  $T$  和经 DYC 模糊控制模块输出的附加横摆力矩  $M$  合理分

配给四个轮毂电机。本文将附加横摆力矩平均分配给四个车轮，同时考虑轮毂电机受到最大驱动转矩  $T_{\max}$  的限制，则各轮驱动转矩为：

$$\begin{aligned} T_1 &= T/4 - M \times r/2B, T_2 = T/4 + M \times r/2B, \\ T_3 &= T/4 - M \times r/2B, T_4 = T/4 + M \times r/2B; \\ T_1 &\leq T_{\max}, T_2 \leq T_{\max}, T_3 \leq T_{\max}, T_4 \leq T_{\max} \circ \end{aligned}$$

其中： $T_1, T_2, T_3, T_4$  分别为左前、右前、左后、右后四个车轮的驱动转矩； $r$  为轮胎滚动半径； $B$  为轮距。

表 3 参数自校正模糊规则

Tab.3 Parameter self-adjusting fuzzy rules

$e(\beta)/$ $ec(\gamma)$	$e(\gamma)$						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PB	CH	CM	CL	Z	CL	CM	CH
PM	CM	CL	Z	Z	Z	CL	CM
PS	CL	Z	AL	AM	AL	Z	CL
Z	Z	Z	AL	AH	AL	Z	Z
NS	CL	Z	AL	AM	AL	Z	CL
NM	CM	CL	Z	Z	Z	CL	CM
NB	CH	CM	CL	Z	CL	CM	CH

### 3 仿真试验与验证

为了验证控制算法的效果，选取 CarSim 车体动力学仿真软件中的 D 级 SUV 进行 Matlab/Simulink 与 CarSim 联合仿真试验，针对低速急剧双移线工况和高速连续正弦工况进行仿真分析。该模型车质量为 1 509 kg；簧载质量为 1 429 kg；质心高度为 0.67 m；质心到前轴距离为 1.05 m；轮距为 1.565 m，轴距为 2.619 m；车轮滚动半径为 0.357 m；汽车绕 Z 轴转动惯量为 1 767 kg·m<sup>2</sup>；轮毂电机最大驱动转矩为 200 N·m。

#### 3.1 低速急剧双移线工况

车速设置为 50 km/h，路面附着系数设为 0.75，路径设定如图 3 所示。CarSim 中自带的驾驶员模型可以根据路径计算出车辆实时方向盘转角。从图 3 中可以看出，无控制的车辆较大地偏离了期望路径，参数自校正模糊控制较模糊控制能更好地跟踪期望路径。图 4 可以看出，参数自校正模糊控制下的车辆横摆角速度略大于模糊控制下的车辆横摆角速度，车辆的机动性更好。图 5 中显示无控制的车辆质心侧偏角明显大于模糊控制和参数自校正模糊控制。

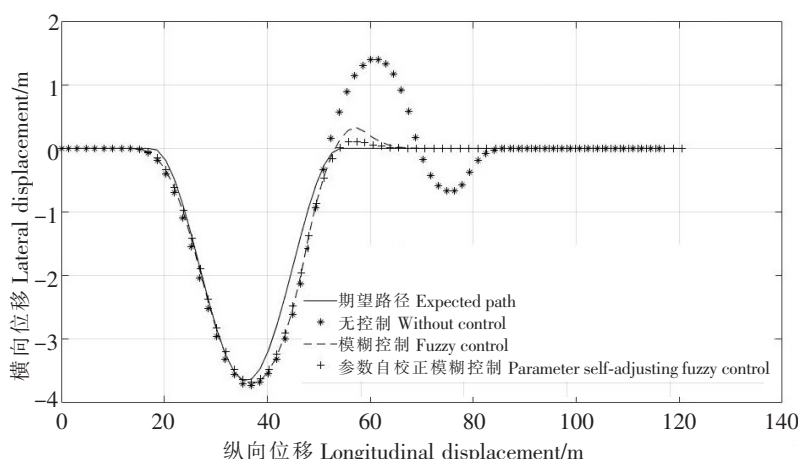


图 3 车辆行驶轨迹

Fig.3 Vehicle trajectory

图 6 为模糊控制和参数自校正模糊控制下的车辆后轮转角，与横摆角速度对比后发现，后轮转角与横摆角速度趋势相反。图 7 ~ 图 8 分别为模糊控制和参数自校正模糊控制的四轮驱动力矩，转弯时内侧车轮和外侧车轮具有明显的差力效果。方向盘转角如图 9 所示。

#### 3.2 高速连续正弦工况

设置车速为 100 km/h，路面附着系数为 0.4。

从图 10 ~ 图 12 可以看出，无控制车辆在连续转向过程中发生了严重滑移，且车辆质心侧偏角较大；而模糊控制和参数自校正模糊控制的车辆控制效果较好。其中参数自校正模糊控制相对于模糊控制车辆横摆角速度和质心侧偏角都略小，说明在高速正弦工况下，参数自校正模糊控制的稳定性更好。图 13 为连续正弦工况下模糊控制和参数自校正模糊控制下的车辆后轮转角，与横摆角速度对比后发现，后轮转角与横摆角速度趋势相同。图 14 ~ 15 分别为模糊控制和参数自校正模糊控制的四轮驱动力矩，两者变化趋势相同，且转弯时内侧车轮和外侧车轮差力效果明显。



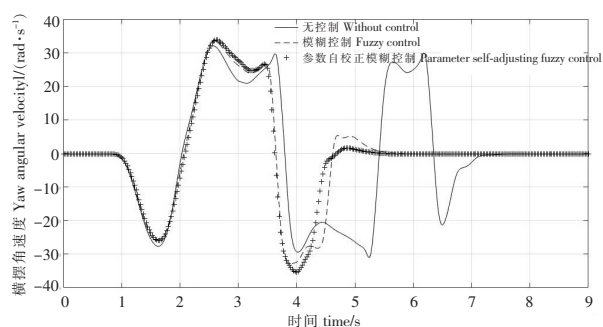


图4 横摆角速度响应曲线

Fig.4 Response curves of yaw rate

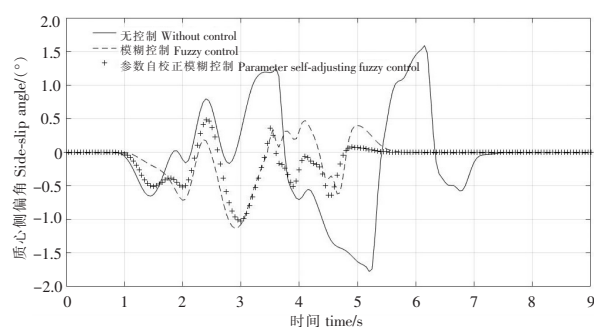


图5 质心侧偏角响应曲线

Fig.5 Response curves of side-slip angle

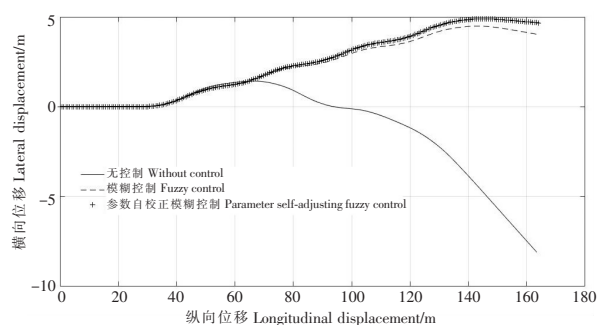


图6 后轮转角

Fig.6 Rear wheel steering angles

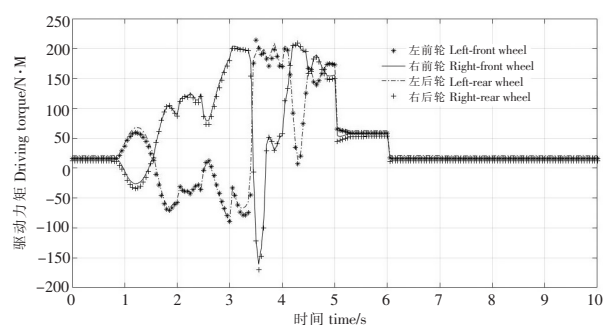


图7 模糊控制四轮驱动力矩

Fig.7 Four-wheel driving torque determined by fuzzy control

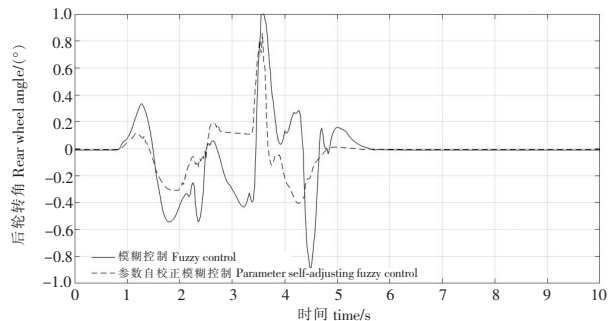


图8 参数自校正模糊控制四轮驱动力矩

Fig.8 Four-wheel driving torque determined by parameter self-adjusting fuzzy control

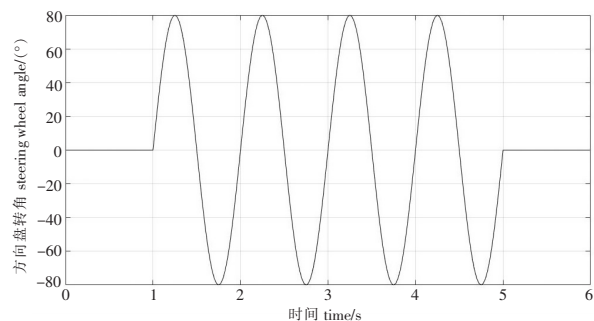


图9 方向盘转角

Fig.9 Steering wheel angle

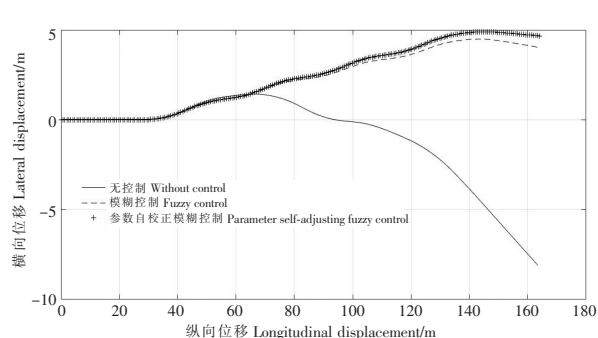


图10 车辆行驶轨迹

Fig.10 Vehicle trajectory

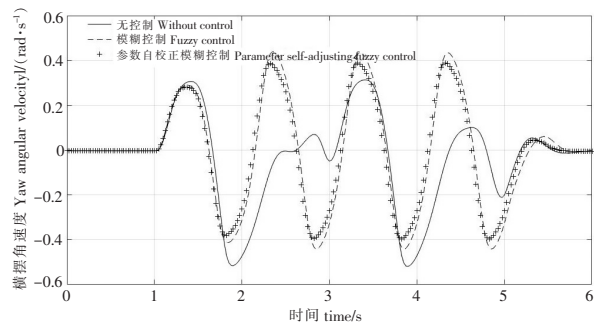


图11 横摆角速度响应曲线

Fig.11 Response curves of yaw rate

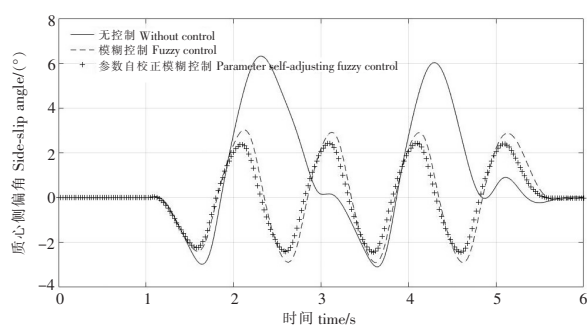


图 12 质心侧偏角响应曲线

Fig.12 Response curves of side-slip angle

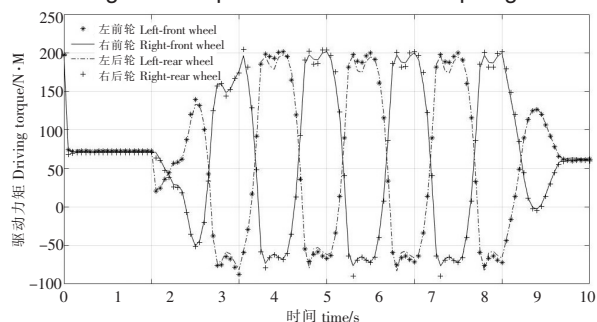


图 14 模糊控制四轮驱动力矩

Fig.14 Four-wheel driving torque determined by fuzzy control

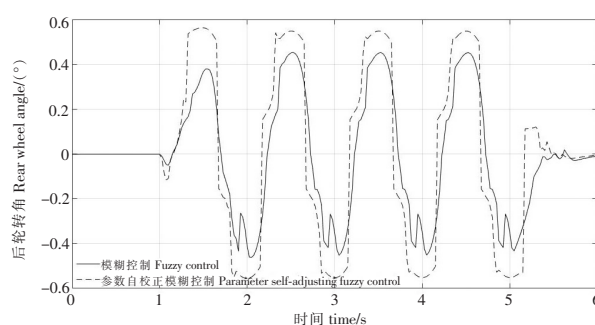


图 13 后轮转角

Fig.13 Rear wheel steering angles

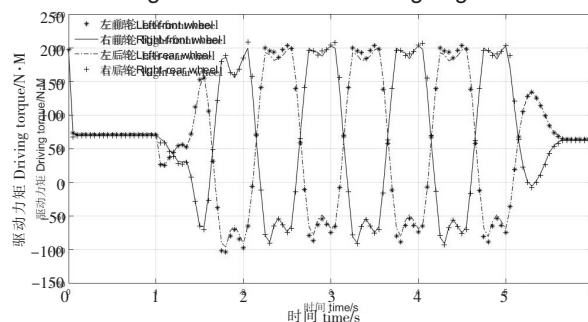


图 15 参数自校正模糊控制四轮驱动力矩

Fig.15 Four-wheel driving torque by parameter self-adjusting fuzzy control

## 4 结语

本文利用参数自校正模糊控制器在线修正模糊控制参数,进行四轮转向和横摆力矩联合控制研究。通过对比低速急剧双移线 and 高速连续正弦工况下的无控制、有参数自校正模糊控制和无参数自校正模糊控制三种控制策略发现:模糊控制和有参数自校正模糊控制效果明显好于无控制车辆,且利用参数自校正模糊控制的四轮转向和横摆力矩联合控制与模糊控制相比,提高了低速机动性和高速稳定性。

## [参考文献]

- [1] 宋宇,陈无畏,陈黎卿. 车辆稳定性系统与四轮转向系统集成控制研究 [J]. 中国机械工程, 2014, 25(20): 2788-2794.
- [2] 刘启佳. 四轮转向汽车侧向动力学最优控制和内外环联合控制研究 [D]. 北京:北京理工大学, 2014.
- [3] 汪东明. 基于DYC控制的4WS汽车操纵稳定性研究 [J]. 现代机械, 2009(6): 42-45.
- [4] 殷国栋,陈南. 四轮转向车辆控制系统操纵稳定性道路试验 [J]. 中国公路学报, 2009, 22(6): 116-120.
- [5] 邱浩,董铸荣,雷正保. 四轮独立驱动电动车ARS与DYC集成控制与试验 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2016, 37(3): 268-276.
- [6] SONG J. Integrated control of brake pressure and rear-wheel steering to improve lateral stability with fuzzy logic [J]. International Journal of Automotive Technology, 2012, 13(4): 563-570.
- [7] 李彬,喻凡. 四轮转向和差动制动联合控制的车辆横摆动力学 [J]. 农业机械学报, 2008, 39(12): 1-6.
- [8] 陈东,童贻银,武楠. 电动车四轮转向与差动驱动的联合仿真研究 [J]. 制造业自动化, 2015(20): 90-94.
- [9] 李刚,韩海兰. 四轮轮毂电机电动车横摆力矩参数自调整模糊控制 [J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(4): 365-370.
- [10] 殷国栋,陈南. 四轮转向直接横摆力矩鲁棒集成控制仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(16): 4264-4268.
- [11] 邱浩. 四轮独立驱动电动车ARS与DYC集成控制与实验研究 [D]. 长沙:长沙理工大学, 2015.
- [12] 董景新,吴秋平. 现代控制理论与方法概论 [M]. 北京:清华大学出版社, 2016.

(责任编辑 陈敏 英文审校 郑青榕)