

文章编号:1000-582X(2007)04-0001-05

# 基于模糊技术的汽车 ESP 系统综合反馈控制\*

谢敏松,李以农,郑玲,裴锦华

(重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆 400030)

**摘要:**对汽车 ESP(Electronic Stability Program)系统控制方法进行了分析,提出了以模糊控制技术为核心的横摆角速度和质心侧偏角综合反馈控制方法.考虑了轮胎的非线性特性对汽车转向特性与行驶稳定性的重要影响,考虑非线性轮胎模型(魔术公式),建立了二自由度四轮汽车模型及汽车参考模型.运用模糊控制原理,设计了模糊控制器,并基于 Simulink 进行了控制仿真.仿真结果表明:这种控制方法可以很好地控制汽车的横摆角速度和质心侧偏角,提高汽车的侧向稳定性.

**关键词:**模糊控制;综合反馈控制;ESP;横摆角速度;质心侧偏角

**中图分类号:**U461

**文献标志码:**A

ESP 是行驶车辆的一种主动安全系统,是继汽车防抱死制动系统 ABS 和驱动力控制系统 ASR 发展起来的.ESP 通过传感器测量方向盘输入角、横摆角速度、侧向加速度和 4 个轮速,由 ECU 计算出驾驶员期望的行驶轨迹和汽车运动状态,并对路面状况进行识别,再通过一定的控制方法对汽车进行控制,从而得到较好的制动和驱动效能,防止出现危险状况,从而更有效、更显著地提高汽车的操纵稳定性和行驶安全性<sup>[1-2]</sup>.

汽车 ESP 系统是一个复杂的系统,其控制方法是目前汽车界研究的热点<sup>[3-5]</sup>.近几年来,有一些学者开始尝试用现代控制理论的一些控制方法进行汽车稳定性控制,并取得了一些控制效果<sup>[6-9]</sup>.在国内,ESP 的研究还处在起步阶段,只有少数学者进行了控制方法的仿真研究<sup>[10-11]</sup>.笔者针对汽车 ESP 系统的控制方法进行了研究,提出了以模糊控制技术为核心的横摆角速度和质心侧偏角综合反馈控制,并进行了仿真分析.

## 1 基于模糊技术的横摆角速度和质心侧偏角综合反馈控制

ESP 控制的任务,即稳定性控制与轨迹保持,一般而言稳定性由横摆角速度来描述,而轨迹问题可以由汽车的质心侧偏角来描述.2 个控制变量是相互耦合的.基于此,笔者提出了控制系统横摆角速度和质心侧

偏角综合控制.通过实际车辆与汽车参考模型输出值比较,设计了横摆角速度和质心侧偏角 2 个模糊控制器,对汽车侧向稳定性进行了综合控制.其控制框图如图 1 所示.

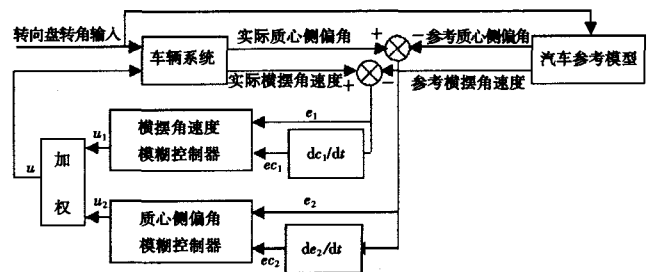


图 1 横摆角速度和质心侧偏角综合反馈控制框图

把 2 个控制的输出信号经过加权并相加后,就得到控制信号,即

$$u = w_1 u_1 + w_2 u_2, \quad (1)$$

式中, $u$  为控制器总输出; $u_1, w_1$  为横摆角速度模糊控制器输出及其加权因子; $u_2, w_2$  为质心侧偏角模糊控制器输出及其加权因子.

## 2 仿真模型的建立

如图 1 所示,仿真模型可根据仿真工况输入转向角、车速及道路条件,输出的汽车运动学参数为横摆角速度、质心侧偏角.进行汽车 ESP 控制系统的仿真分

\* 收稿日期:2006-11-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50475064);重庆市自然科学基金重点项目(CSTC,2006BA6017)

作者简介:谢敏松(1983-),男,江西新余人,重庆大学硕士研究生,主要从事汽车系统动力学与智能控制的研究.李以农,男,教授,博士生导师,(Tel.):023-65106094;E-mai:lynli@cqu.edu.cn.

析,首先要建立合适的轮胎模型,在此基础上建立整车模型,以及汽车参考模型。

### 1.1 轮胎模型

汽车依靠轮胎与地面的相互作用产生各种运动,轮胎的特性对汽车有着重要的作用。轮胎的侧偏特性是汽车操纵稳定性的基础,轮胎的非线性特性对汽车的转向特性及行驶稳定性有重要影响。笔者选用 H. B. Pacejke 轮胎模型(魔术公式)。

H. B. Pacejke 轮胎模型是 1987 年荷兰 Delft 理工大学的 H. B. Pacejke 教授提出,后被称为“魔术公式”的轮胎模型,这是一个基于试验数据的经验轮胎模型,通过对试验数据拟合而得到的<sup>[12]</sup>。这种试验通过专用的试验台架或试验车进行。这些试验设备能够排除次要因素模拟出特定的轮胎行驶条件,准确地再现轮胎的各种工作情况。用于试验过程中检测各类数据的仪器具有很高的精度和灵敏度,并配有功能强大的数据处理系统,从而保证了试验数据准确可靠。H. B. Pacejke 轮胎模型用一套公式即可表达出轮胎的力学特性,统一性强,编程方便,需拟合的参数较少,且各个参数都有明确的物理意义,容易确定其初值。

### 1.2 二自由度汽车模型

为了研究汽车 ESP 控制系统的动力学特性,建立一个二自由度的四轮汽车模型。整个车辆作为一个整体,是一个多自由度的系统。笔者根据实际需要出发,将整车模型简化成 2 个自由度的汽车模型,见图 2,即横向平移运动以及绕 Z 轴的横摆运动 2 个自由度。分析时做如下假设:忽略汽车转向系统的影响,直接以前轮转角作为输入,并且认为左、右转向轮转角相同;忽略汽车悬架系统的作用,认为汽车只作平行于地面的运动,即汽车沿 Z 轴的位移为 0;汽车沿 X 轴的前进速度视为不变;汽车绕 Y 轴的俯仰角和绕 X 轴的侧倾角均为 0。

图 2 是一个由前后 4 个有侧向弹性的轮胎支承于

地面,具有侧向及横摆运动的二自由度汽车模型。分析时,令车辆坐标系的原点与汽车质心重合。因此,作平

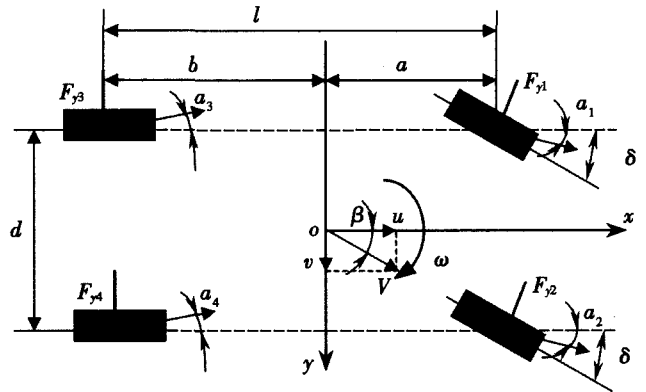


图 2 二自由度四轮汽车模型

面运动的汽车对车辆坐标系的运动微分方程式为:

$$\left. \begin{aligned} m(\dot{v} + u\omega) &= (F_{y1} + F_{y2}) \cos\delta + F_{y3} + F_{y4} \\ I_z \dot{\omega} &= a(F_{y1} + F_{y2}) \cos\delta - b(F_{y3} + F_{y4}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

汽车的参考模型一般选用二自由度线性单轨模型,可以由上面的二自由度模型进一步简化得到。二自由度线性单轨模型轮胎侧偏特性处于线性范围内。

考虑到  $\delta$  角较小,参考模型运动方程可表述为:

$$\left. \begin{aligned} mu(\dot{\beta} + \omega) &= F_{yf} + F_{yr} \\ I_z \dot{\omega} &= F_{yf} \cdot a - F_{yr} \cdot b \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中汽车前轮和后轮所受到的侧向力与其相应的侧偏角成线性关系,即

$$\left. \begin{aligned} F_{yf} &= C_f \cdot a_f \\ F_{yr} &= C_r \cdot a_r \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} a_f &= \delta - \beta - \frac{a\omega}{u} \\ a_r &= -\beta + \frac{b\omega}{u} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

将式(4)、(5)代入到公式(3)中并进行拉普拉斯变换可以得到线性二自由度单轨模型的传递特性:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\omega}{\delta}(s) &= \frac{muaC_{f,s} + lC_fC_r}{mul_z \cdot s^2 + [I_z(C_f + C_r) + m(a^2C_f + b^2C_r)] \cdot s + \frac{C_fC_r}{u} l^2 \left[ 1 + \frac{mu^2(bC_r - aC_f)}{C_fC_r l^2} \right]} \\ \frac{\beta}{\delta}(s) &= \frac{I_zC_f \cdot s + \frac{bl}{u} C_fC_r - muaC_f}{mul_z \cdot s^2 + [I_z(C_f + C_r) + m(a^2C_f + b^2C_r)] \cdot s + \frac{C_fC_r}{u} l^2 \left[ 1 + \frac{mu^2(bC_r - aC_f)}{C_fC_r l^2} \right]} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中,  $m$  为汽车总质量;  $I_z$  为绕 Z 轴的转动惯量;  $l$  为轴距;  $d$  为车轮轮距;  $a$ 、 $b$  分别是质心至前后轴距离;  $h_g$

为车体质心高度; $\omega$ 为横摆角速度; $u, v$ 分别是汽车沿 $x$ 轴和 $y$ 轴方向的速度; $\delta$ 为转向轮转角; $\beta$ 为质心侧偏角; $\alpha_i (i=1 \sim 4)$ 是轮胎的侧偏角; $F_{y_i} (i=1 \sim 4)$ 是轮胎所受的侧向力; $C_f, C_r$ 分别是前后轮总的侧偏刚度.

### 3 模糊控制器的设计

模糊控制是一个处理不确定性、非线性的有力工具,它采用模糊推理规则以模仿人在不确定环境下的决策行为,从经验中自动产生规则.其中模糊控制器是模糊控制的核心.笔者采用MatLab/Fuzzy Logic工具箱设计模糊控制器.

#### 3.1 模糊控制器的结构

模糊控制器结构框图如图3所示.图中 $k_e, k_{ec}, k_u$ 分别为输入输出变量的量化因子和比例因子.

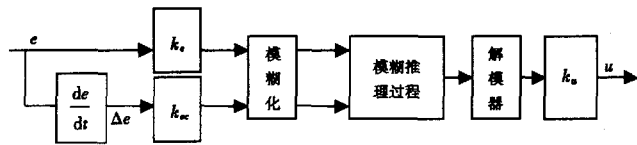


图3 模糊控制器结构框图

笔者选取实际横摆角速度与参考横摆角速度之间的误差 $e_1$ 以及误差变化率 $ec_1$ ,横摆调节力矩 $u_1$ 分别作为横摆角速度模糊控制器的输入输出变量;实际质心侧偏角与参考质心侧偏角之间的误差 $e_2$ 以及误差变化率 $ec_2$ ,横摆调节力矩 $u_2$ 分别作为质心侧偏角模糊控制器的输入输出变量.

#### 3.2 输入输出变量模糊子集

对于输入输出变量,2个控制器都采用5个语言模糊子集来确定,即{NB、NS、Z、PS、PB};误差、误差

变化率及输出变量所属模糊集论域都为 $[-1, -0.8, -0.6, -0.4, -0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1]$ .输入变量,输出变量模糊子集采用三角形隶属函数.

#### 3.3 模糊控制规则

模糊控制规则是模糊控制器重要组成部分,它用语言的方式描述了控制器输入量和输出量之间的关系,即它们之间的模糊关系.模糊控制规则是根据人们的经验,以模糊推理的方式给出的.2个模糊控制器中2个输入量用5个语言模糊集来描述,分别形成25条控制规则.建立的模糊控制规则表如表1、表2.

表1 横摆角速度模糊控制器控制规则表

$ec_1$	$e_1$				
	PB	PS	Z	NS	NB
PB	NB	NB	NB	NS	Z
PS	NB	NB	NS	PS	PS
Z	NB	NS	Z	PS	PB
NS	NS	NS	Z	PB	PB
NB	NS	NS	PS	PB	PB

表2 质心侧偏角模糊控制器控制规则表

$ec_2$	$e_2$				
	PB	PS	Z	NS	NB
PB	PB	PB	PB	PS	Z
PS	PB	PB	PS	NS	NS
Z	PB	PS	Z	NS	NB
NS	PS	PS	Z	NB	NB
NB	PS	PS	NS	NB	NB

根据图3设计的模糊控制器,用Simulink实现整个模型综合反馈的模糊控制系统模块,并与汽车参考模型和车辆系统连在一起,封装成可观测不同控制效果的仿真模型如下图4.

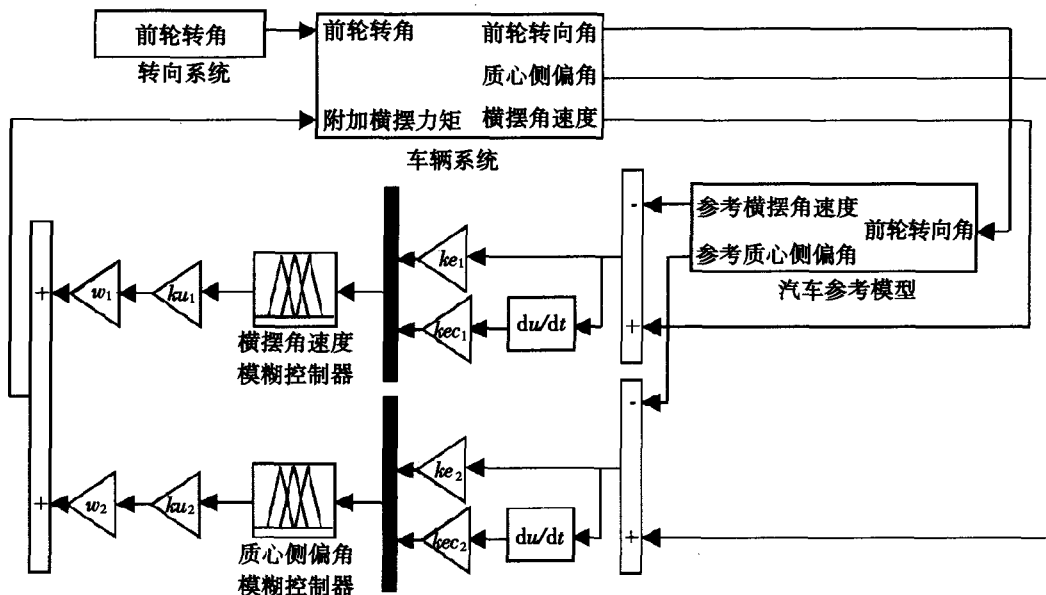


图4 仿真框图

### 4 仿真结果及分析

选用某车型进行仿真分析,其参数: $m$  为 1820 kg; $I_z$  为 3 800 kg·m<sup>2</sup>; $l$  为 3.048 m; $a$  为 1.463 m; $b$  为 1.585 m; $d$  为 1.5 m; $h_g$  为 0.5 m; $C_f$  为 38 000 N·rad<sup>-1</sup>; $C_r$  为 46 000 N·rad<sup>-1</sup>;轮胎模型参数采用文献[13]提供的数据。

在仿真计算中采用单周期正弦为前轮转角输入,最大输入角为 0.14 rad,频率为 0.5 Hz,汽车初始速度为 25 m·s<sup>-1</sup>,路面附着系数为:湿路面( $\mu=0.5$ ),仿真结果见图 5-8。从图 5 和图 6 中可以看出,通过横摆角速度和质心侧偏角综合控制,汽车的横摆角速度、质心侧偏角基本与参考模型吻合,得到了很好的控制效果。从图 7-8 也可以看出,有控制的相位图为一闭合的曲线表明其运动是稳定的,并且与参考模型很接近。所以,基于模糊控制的横摆角速度和质心侧偏角综合反馈控制对汽车的稳定性有很大的提高,同时运行轨迹也能得到较好的跟踪,可按照驾驶员的意愿进行行驶。通过输出力矩的加权,得到一个综合的加权控制量,通过试凑能够对汽车的侧向稳定性得到一个很大的提高。

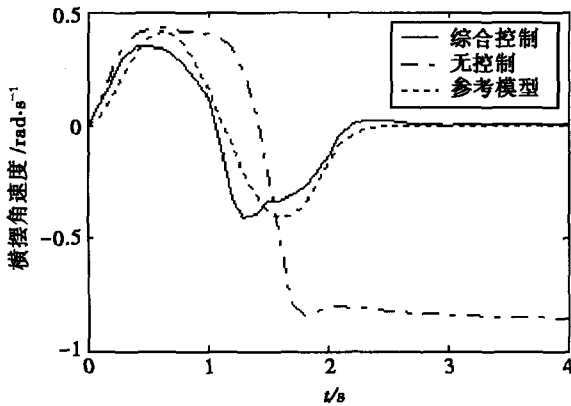


图 5 横摆角速度变化对比曲线

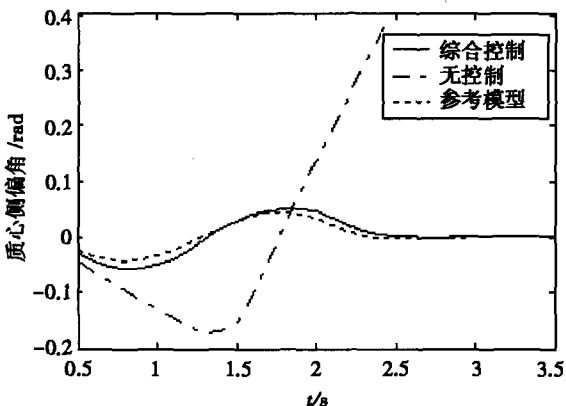


图 6 质心侧偏角变化对比曲线

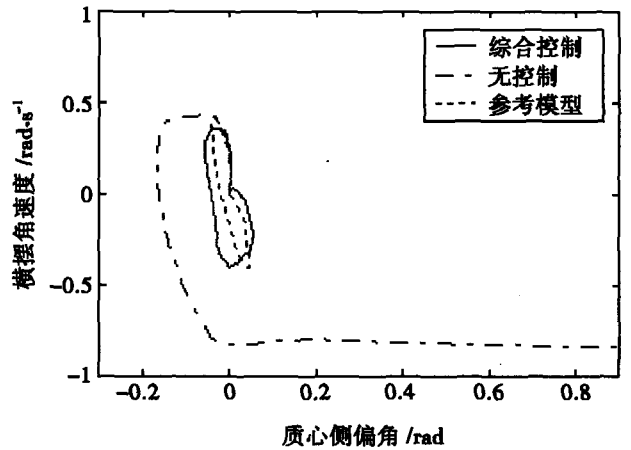


图 7 质心侧偏角与横摆角速度的相位图

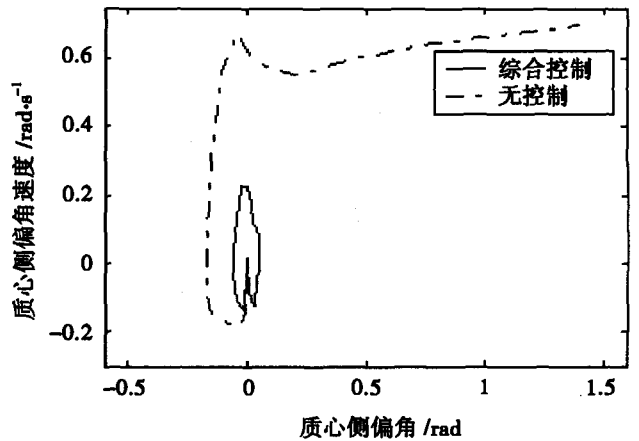


图 8 质心侧偏角与质心侧偏角速度的相位图

### 5 结论

1) 采用 H. B. Pacejke 轮胎模型,讨论了轮胎的非线性特性对汽车转向特性及行驶稳定性的影响。

2) 设计了横摆角速度和质心侧偏角模糊控制器。模糊控制是一种不依赖于控制对象数学模型的非线性智能控制,具有鲁棒性强、对干扰和参数变化不敏感,对于 ESP 这种非线性、时变控制系统是一种非常有效的控制方法。

3) 由于采用横摆角速度和质心侧偏角综合反馈控制,而它们是最能反映汽车运动状态的 2 个参数,使得汽车的稳定性有很大的提高,同时运行轨迹也得到了较好的跟踪,并能够有效地改善车辆的操纵稳定性。

4) 仿真结果表明,所设计的模糊控制器能很好的对汽车 ESP 系统进行控制,其结构是合理的,控制算法是有效的,具有一定的实用价值。

### 参考文献:

[1] 王德平,郭孔辉. 车辆动力学稳定控制的控制原理[J]. 机械工程学报,2000,36(3):97-99.

- [2] 贾豫东,宋健,孙群. 用于电子稳定程序的汽车模型和控制策略[J]. 公路交通科技,2004,21(4):132-136.
- [3] TAEHYUM SHIM, DONALD MARGOLIS. Using Mu Feed-forward for Vehicle Stability Enhancement[J]. Vehicle System Dynamics, 2001, 35(2):103-119.
- [4] YOSHIKI FUKADA. Slip Angle Estimation for Vehicle Stability Control[J]. Vehicle System Dynamics, 1999, 32(4):375-388.
- [5] ALEKSANDER HAC, MELINDA D SIMPSON. Estimation of Vehicle Side Slip Angle and Yaw Rate[J]. IEEE, 2000,109(6):1 032-1 038.
- [6] KIHONG PARK, SEUNG-JIN HEO, INHO BAEK. Controller Design for Improving Lateral Vehicle Dynamics Stability[J]. JSAE Review,2001(22):481-486.
- [7] TOHRU YOSHIOKA, TOMOHIKO ADACHI, TETSURO BUTSUEN, et al. Application of Sliding-mode Theory to Direct Yaw-moment Control[J]. JSAE Review,1999(20):523-529.
- [8] YOUSSEF A GHONEIM, WILLIAM C LIN, DAVID M SIDLOSKEY, et al. Integrated Chassis Control System to Enhance Vehicle Stability[J]. International Journal of Vehicle Design, 2000,23(1):124-144.
- [9] MOTOKI SHINO, MASAO NAGAI. Yaw-moment Control of Electric for Improving Handling and Stability[J]. JSAE Review,2001(22):473-480.
- [10] 程军. 车辆动力学控制的模拟[J]. 汽车工程,1999,21(4):199-205
- [11] 王德平,郭孔辉,宗长富. 车辆动力学稳定控制的理论研究[J]. 汽车工程,2000,22(1):7-9.
- [12] Pacejka H B. Tire Modelling for Using Vehicle Dynamics Studies[J]. SAE paper,1987,870421:31-36.
- [13] 庄继德. 汽车轮胎学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996.

## Synthesized Feedback Control of the ESP system Based on Fuzzy technology

*XIE Min-song, LI Yi-nong, ZHENG Ling, PEI Jin-hua*

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** Based on the fuzzy control technology, the feedback control method of synthesized yaw rate and side slip angle is presented for the ESP system. The influence of nonlinear characteristics of tires on cornering characteristics and driving stability of vehicle is considered. The nonlinear tire model (Magic Formula) is adopted, and the four-wheel vehicle model with two degrees of freedom and a vehicle reference model are set up on this basis. Then the fuzzy controller of yaw rate and the fuzzy controller of side slip angle are designed and a simulation model generated by Simulink software is used. Simulation results show that the lateral stability of vehicle can be enhanced by controlling yaw rate and side slip angle with the synthesized feedback control method.

**Key words:** fuzzy control; synthesized feedback control; ESP; yaw rate; side slip angle

(编辑 张小强)