

文章编号:1671-5497(2005)02-0111-05

# 模糊控制在四轮牵引力控制系统中的应用

赵健<sup>1</sup>, 李静<sup>1</sup>, 李幼德<sup>1</sup>, 宋大凤<sup>1</sup>, 吴海青<sup>2</sup>

(1. 吉林大学汽车工程学院, 长春 130022; 2. 装甲兵技术学院车辆工程系, 长春 130117)

**摘要:**针对四轮驱动汽车,应用模糊理论设计了牵引力控制系统的油门控制器和制动控制器。建立了基于 Matlab/Simulink 的硬件在环开发平台,并选择分离路面和棋盘路面两种工况进行了硬件在环试验。结果表明,所设计的控制器能有效地消除驱动轮过度滑转,从而提高了车辆的牵引性能,且在路面条件突变时具有较强的适应性。

**关键词:**车辆工程;四轮驱动;牵引力控制系统;模糊控制;硬件在环试验

**中图分类号:**U463.54 **文献标识码:**A

## Applications of Fuzzy Control on Four-Wheel Traction Control System

ZHAO Jian<sup>1</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, LI You-de<sup>1</sup>, SONG Da-feng<sup>1</sup>, WU Hai-qing<sup>2</sup>

(1. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Department of Vehicle Engineering, Technology Academy of Armored Forces, Changchun 130117, China)

**Abstract:** Fuzzy theory was used to design throttle controller and braking controller of traction control system for four-wheel drive vehicles. A hardware-in-the-loop simulator was built based on Matlab/Simulink, and several tests were processed on split- $\mu$  road and chess road. The results show that the controllers can estimate excessive slippage of driven wheel so as to improve traction ability of vehicles effectively, and they are adaptable when road conditions change suddenly.

**Key words:** automotive engineering; four-wheel drive; traction control system; fuzzy control; hardware-in-the-loop

## 0 引言

牵引力控制系统是一种通过控制驱动车轮的过度滑转来提高车辆牵引性能的汽车主动控制系统。当前国内对牵引力控制系统的研究多集中于两轮驱动车辆。由于越野车辆驱动轮打滑的情况时有发生,故对四轮驱动牵引力控制系统的研究

越来越引起人们的重视。实用的牵引力控制系统多采用发动机输出扭矩和制动的联合控制方式,分别应用 PID 和逻辑门限值控制方法。这种控制系统算法简单、响应较快、对系统硬件要求较低。但控制效果主要依赖于预先设定的控制参数,适应性较差,无法保证在各种车辆行驶工况下都能得到最佳的控制效果。模糊控制作为一种智能控制方法已被应用于牵引力控制系统的研究

收稿日期:2004-10-12.

基金项目:中国人民解放军总装备部“十五”预研项目(2001-CL-0102).

作者简介:赵健(1978-),男,博士研究生.研究方向:汽车牵引力电子控制系统. E-mail:fireball@email.jlu.edu.cn

通讯联系人:李幼德(1946-),男,教授,博士生导师.研究方向:汽车地面系统分析与控制. E-mail:auto\_tcs@jlu.edu.cn

中。通过设定合理的模糊规则,可以有效解决车辆在不同路面、档位和车速下行驶时因控制参数不能适应而带来的问题。

作者以某 4 ×4 越野车为研究对象,设计了发动机模糊控制器和制动模糊控制器,并采用硬件在环的试验方法验证了控制器的有效性<sup>[1,2]</sup>。

### 1 模糊控制器设计

系统采用发动机输出力矩控制和独立制动控制联合控制的方式。对于发动机控制系统,由模糊控制系统得到发动机油门控制量,再根据相应的执行器工作特性将其转换为步进电机步长及旋转方向。对于制动控制系统,由模糊控制系统得到各驱动车轮压力调节量,进而得到增减压梯度等级,应用 Matlab/ Stateflow 工具箱将其转换为与制动压力调节器相应的电磁阀及泵电机控制信号。

#### 1.1 模糊控制系统

模糊控制系统工作原理如图 1 所示。系统输入车轮实际滑转率与目标滑转率的误差  $e$  和误差变化量  $e'$ ,输出控制目标增量;油门控制系统输入实际车轮平均滑转率与油门控制目标滑转率的误差  $e_{K_{acc}}$  和误差变化量  $e'_{K_{acc}}$ ,输出油门控制增量  $K_{acc}$ ;制动控制系统输入单个车轮滑转率与制动控制目标滑转率的误差  $e_p$  和误差变化量  $e'_p$ ,输出制动压力控制增量  $p^{[3]}$ 。

图 1 模糊控制系统基本工作原理

Fig. 1 Block diagram of fuzzy control system

输入及输出量的模糊化:设车轮滑转率控制误差  $e = s - s_0$  的变化区间为  $[s_{min} - s_{0max}, s_{0max} - s_{min}]$ 。显然,在驱动工况下车轮滑转率变化范围为  $0 \sim 1$ 。为研究采取不同目标滑转率对控制效果的影响,考虑将车轮目标滑转率  $s_0$  亦在范围  $0 \sim 1$  取值,因此,设  $e$  的变化区间取  $[-1, 1]$ ,而  $e'$  的变化区间可取  $[e_{min} - e_{max}, e_{max} - e_{min}]$  即  $[-2,$

$2]$ 。根据执行器的响应特性,将  $K_{acc}$  和  $p$  的变化区间分别取  $[-10, 10] \%$  和  $[-6000, 6000] Pa$ 。将各参量的变化区间均转化为相应的模糊论域,取量化因子,并将其在模糊论域上模糊化。

图 2 为各控制参量的隶属度函数,表 1、表 2 为 Mandani 模糊控制系统控制规则。利用 Matlab/ Fuzzy 工具箱可得到其隶属度函数三维表示,如图 3 所示<sup>[4]</sup>。

(a)  $e$  及  $e'$  的隶属度函数

(b)  $p$  的隶属度函数

(c)  $K_{acc}$  的隶属度函数

图 2 各控制参量的隶属度函数

Fig. 2 Membership function of each control parameter

表 1 油门控制增量  $K_{acc}$  的模糊控制规则

Table 1 Fuzzy control rules of throttle control increment  $K_{acc}$

$e$	$e'$						
	PL	PM	PS	ZE	NS	NM	NL
PL	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL
PM	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NS
PS	NS	NS	NS	NS	ZE	ZE	PS
ZE	NS	NS	NS	ZE	PS	PS	PS
NS	NS	NS	ZE	PS	PS	PS	PS
NM	ZE	ZE	PS	PS	PS	PL	PL
NL	ZE	PS	PS	PS	PS	PL	PL

表 2 制动压力控制增量  $p$  的模糊控制规则

Table 2 Fuzzy logic control rules of brake pressure increment  $p$

$e$	$e$						
	PL	PM	PS	ZE	NS	NM	NL
PL	PL	PL	PM	PM	PS	PS	ZE
PM	PL	PM	PM	PS	PS	ZE	NS
PS	PM	PM	PS	PS	ZE	NS	NS
ZE	PM	PS	PS	ZE	NS	NS	NM
NS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
NM	PS	ZE	NS	NS	NM	NM	NL
NL	ZE	NS	NS	NM	NM	NL	NL

(a) 发动机输出力矩控制规则

(b) 制动力矩控制规则

图 3 TCS 的模糊控制规则

Fig. 3 Fuzzy control rules of traction control system

1. 2 控制信号生成

(1) 油门控制信号

电子油门采用步进电机驱动,需将控制量  $K_{acc}$  转换为相应的步进电机工作步数。对油门步进电机采用恒定的速度进行驱动,在选定速度下对步进电机进行标定,得到油门由怠速增至最大速度时电机运行  $n_0$  步,则对应控制量  $K_{acc}$ ,应使电机运行步数为:

$$n = \text{fix}(n_0 \times K_{acc} / 100)$$

式中:fix 为向零方向取整。

(2) 制动压力控制信号

制动控制由制动压力调节器 HCU 来执行,需将控制量  $p$  转换为相应的 HCU 阀信号。生成阀信号的程序流程如图 4 所示。首先根据控制量  $p$  和轮缸压力反馈  $p_{in}$  计算增减压标志 Flag、保压次数  $k_p$  和目标压力  $p_0$ ,随后将其转换成相应的阀信号,直至当前压力反馈值达到目标压力,退出本次循环。

图 4 生成阀信号的程序流程

Fig. 4 Generation of valve-drive signal

2 硬件在环开发平台

应用硬件在环开发平台可实时调整控制系统,具有开发周期短、成本低等优点,同时可以对系统软硬件的匹配情况进行研究<sup>[5]</sup>。

硬件在环开发平台的组成如图 5 所示。软件系统由模糊控制器和仿真模型组成。模糊控制器监控车辆及执行器状态,运算后发出控制信号,仿真模型用于模拟生成车辆加速行驶时的运动状态<sup>[6,7]</sup>;实车硬件系统由加速踏板、电子油门、HCU 和制动系统组成,电子油门和 HCU 响应控制器发出的驱动信号实施牵引力控制;信号处理系统将采集、处理后的传感器信号传给 PC 机,并将控制器发出的控制量转换为驱动信号。

操作者踩下制动踏板,信号处理系统采集油门位置信号,传给软件系统,经仿真得到模拟轮速,由模糊控制器原型生成控制量,经驱动模块处理得到驱动信号,控制电子油门和 HCU 动作,同时将油门位置和制动压力反馈给控制器和仿真模型。

车辆仿真状态和执行器工作状态可直接在 PC 机上观察、处理和保存。

图 5 硬件在环开发平台构成  
 Fig. 5 Configuration of HIL development platform

### 3 试验结果分析

一般在车辆左右两侧路面附着情况不同时,发动机和制动控制才会同时起作用,因此选择附着系数分离路面直行工况。为研究在路面条件发生变化时控制系统软硬件的适应性,又选择棋盘路面直行工况进行试验。路面状况:0~2s 左侧为低附着路面,右侧为高附着路面;2~3.5 s 左侧为高附着路面,右侧为低附着路面;3.5~5 s 左侧为低附着路面,右侧为高附着路面。试验初始车速选定 3 m/s,图 6~9 的试验曲线中,1~4 分别为左前、右前、左后、右后车轮转速,5 为实际车速,6 为油门位置,7~10 分别为左前、右前、左后、右后车轮制动压力。

图 7 附着系数分离路面直行,有 TCS 控制

Fig. 7 Drive on split- $\mu$  road, with traction control

附着系数分离路面直行工况无 TCS 控制和有 TCS 控制时轮速、车速、油门开度和制动压力曲线分别如图 6、图 7 所示。从图中可以看出,无 TCS 控制时,处于低附着侧的两车轮轮速迅速上升,5 s 后车速仅达到 5.9 m/s。有 TCS 控制时,电子油门与 HCU 正确工作,低附着侧车轮滑转得到有效控制,5 s 后车速达到 8.8 m/s,比无 TCS 控制时提高 49.2%。

棋盘路面直行工况无 TCS 控制和有 TCS 控制时轮速、车速、油门开度和制动压力曲线分别如图 8、图 9 所示。从图中可以看出,无 TCS 控制时,处于低附着侧的两车轮轮速迅速上升,5 s 后车速仅达到 6.3 m/s。有 TCS 控制时,电子油门与 HCU 正确工作,低附着侧车轮滑转得到有效控制,5 s 后车速达到 8.2 m/s,比无 TCS 控制

图 6 附着系数分离路面直行,无 TCS 控制

Fig. 6 Drive on split- $\mu$  road, without traction control

糊控制器。通过硬件在环试验,证明该控制器可有效控制驱动车轮的过度滑转,从而提高车辆牵引性能。且系统具有较强的适应性,在路面条件发生跃变时仍能正常工作。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 程军. 汽车防抱死制动系统的理论与实践[M]. 北京:北京理工大学出版社,1999.
- [ 2 ] 李静,李幼德,赵健,宋大风. 四轮驱动汽车牵引力控制系统研究[J]. 吉林大学学报(工学版),2003,33(4):1-6.  
LI Jing, LI You-de, ZHAO Jian, SONG Da-feng. Research on Traction Control System for Four Wheel Drive Vehicle[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2003, 33(4):1-6.
- [ 3 ] 宋大风,李静,石桂花,赵健,李幼德. 基于车辆快速开发系统的汽车牵引力控制目标控制器[J]. 吉林大学学报(工学版),2005,35(1):1-6.  
SONG Da-feng, LI Jing, SHI Gui-hua, ZHAO Jian, LI You-de. Target Controller for Traction Control System Based on Vehicle Rapid Development System[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2005, 35(1):1-6.
- [ 4 ] CHEOK Ka C, HOOGERP Francis B, FALES Walter K. Fuzzy Logic Approach to Traction Control Design[C]. SAE paper 960957.
- [ 5 ] 闻新,周露. 模糊逻辑工具箱的分析与应用[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [ 6 ] SUH M W, SEOK C S, CHUNG J H, KIM S M. Hardware-in-the-Loop Simulation for ABS Based on PC[J]. International Journal of Vehicle Design, 2000,24(2/3):157-170.
- [ 7 ] 李静,李幼德,赵健,管爱华. 汽车加速过程动力学仿真模拟研究[J]. 汽车技术,2003(10):7-9.  
LI Jing, LI You-de, ZHAO Jian, GUAN Ai-hua. Study on Dynamics Simulation of the Vehicle Acceleration Course[J]. Vehicle Technique, 2003(10):7-9.
- [ 8 ] 李静,李幼德,赵健,宋大风. 四轮驱动汽车沙地牵引力控制方法仿真[J]. 吉林大学学报(工学版),2004,34(1):75-78.  
LI Jing, LI You-de, ZHAO Jian, SONG Da-feng. Simulation of Four Wheel Drive Vehicle Traction Control on Sandy Terrain [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2004, 34(1):75-78. (责任编辑 陈永杰)

图 8 棋盘路面直行,无 TCS 控制

Fig. 8 Drive on chess road, without traction control

图 9 棋盘路面直行,有 TCS 控制

Fig. 9 Drive on chess road, with traction control

时提高 30.2%。而且在两侧路面附着情况分别发生跃变时,制动控制器能正确控制各通道进入或退出制动控制<sup>[8]</sup>。

## 4 结束语

通过对四轮驱动牵引力控制系统的研究,设计了实用的发动机输出力矩模糊控制器和制动模