

文章编号: 1002-0268 (2006) 10-0124-04

# 线控制动系统防抱死特性模糊控制方法的仿真研究

林 逸 , 沈 沉 , 王 军  
(北京理工大学, 北京 100081)

摘要: 作者研究分析了直接影响汽车行驶安全性能的汽车制动系统的重要组成部分, 阐述了以油或空气作为传力介质的传统制动系统必将被全电的制动系统——线控制动系统所取代, 线控制动系统是未来制动系统的发展方向。介绍了线控制动系统的分类、结构和工作原理; 建立了线控制动系统和制动执行器的数学模型, 以 1/4 车辆模型为研究对象, 设计了模糊控制器, 并在 Matlab/Simulink 下进行了仿真分析。仿真结果表明, 模糊控制对线控制动系统的防抱死特性取得了理想的控制效果。

关键词: 线控制动; 模糊控制; 仿真

中图分类号: U463.526

文献标识码: A

## A Simulation Study on Fuzzy Control of Anti-lock Characteristic of Brake-by-wire System

LIN Yi , SHEN Chen , WANG Jun  
( Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China )

Abstract: The Important components of braking system to guarantee safety of running automobile, directly affecting its safety performance are analysed and the development trend of traditional braking system, using oil or air as its force transmission media, will be substituted by full electric braking system, brake-by-wire system (BBW) is expounded. The classification, configuration and operating principle of brake-by-wire system are introduced. The mathematic models of brake-by-wire system and brake actuator are set up. A fuzzy controller is designed based on the 1/4 vehicle model, and a computer simulation study is implemented under Matlab/Simulink. The results show that the fuzzy controller characteristic of brake-by-wire system can achieve an ideal control effect on anti-lock braking.

Key words: brake-by-wire (BBW); fuzzy control; simulation

### 0 前言

安全、节能和环保是现代汽车发展的 3 大方向。汽车制动系统是保证汽车安全行驶的重要组成部分, 它直接影响汽车的行驶安全性能。随着高速公路的迅速发展、车速的普遍提高和车流密度的日益增大, 为了保证行车安全, 汽车制动系统的控制变得更加重要。

未来 10 年汽车的制动系统将面临重要变革, 由于具有不可克服的缺点, 使用油或空气作为传力介质的传统制动系统必将被全电的制动系统, 即线控

制动系统 (Brake-By-Wire, BBW) 所取代。线控制动系统是未来制动系统的发展方向。

线控制动系统有助于对制动系统功能的整合, 如 ABS、ASR、ESP 及电子驻车控制等能很方便地整合在一起。

### 1 线控制动系统的结构及原理

总体说来, 线控制动系统可分为两类: 电子液压式制动系统 (EHB, Electro-Hydraulic Braking) 和电子机械式制动系统 (EMB, Electro-Mechanical Braking)<sup>[1-3]</sup>。

EHB 系统利用电子控制系统同时保留了部分的

液压系统，液压系统是一个备用系统，保证系统的电子部分出现故障时还能进行制动。EHB 系统可以看作是 EMB 系统的一个先期产品，不会得到长期使用，因为它不具备完全电子制动的优点<sup>[2]</sup>。

真正的线控制动是 EMB 系统，它除去了整个油压系统，制动力由车轮制动模块中的电机产生。EMB 系统的电子控制器根据电子踏板模块传感器的位移和速度信号，并且结合车速等其他传感器信号，向车轮制动模块的电机发出信号控制其电流和转子转角，进而产生需要的制动力，以达到制动的目的。

汽车线控制动系统主要由车轮制动模块、中央电子控制单元和电子踏板模块等组成。图 1 为线控制动系统控制框图<sup>[4]</sup>。

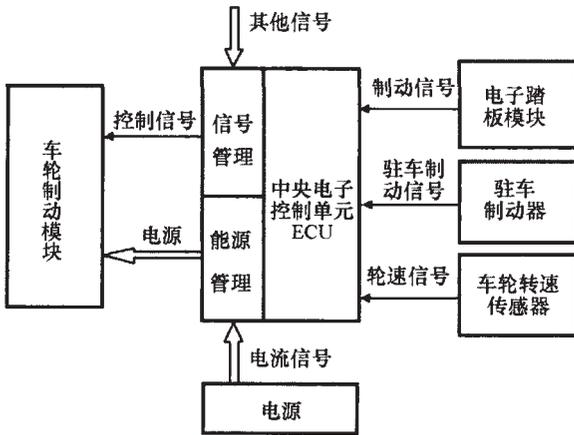


图 1 线控制动系统控制框图

Fig.1 Control diagram of BBW system

(1) 车轮制动模块

车轮制动模块由制动执行器、制动执行器 ECU 等组成，整车共 4 个车轮制动模块。图 2 为电子机械式盘式制动执行器原理示意图。制动执行器的最大特点是模块化，整个机构又可分为 3 个部分：驱动部分——电机；一级减速部分——行星齿轮减速器；滚珠丝杠部分——把旋转运动变成丝杠的直线运动<sup>[5,6]</sup>。

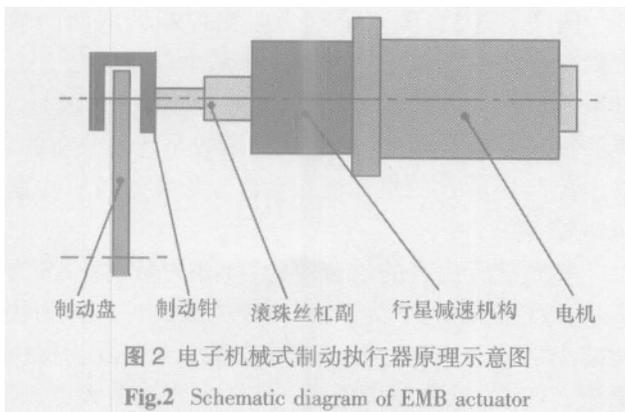


图 2 电子机械式制动执行器原理示意图  
Fig.2 Schematic diagram of EMB actuator

(2) 中央电子控制单元

中央电子控制单元接收制动踏板发出的信号，控制制动器制动；接收驻车制动信号，控制驻车制动；接收车轮传感器信号，识别车轮是否抱死、打滑等，控制车轮制动力，实现防抱死和驱动防滑。

(3) 电子踏板模块

它带有踏板感觉模拟器和用以感知驾驶意愿的传感器。线控制动系统取消了传统液(气)压制动系统中机械式传力机构和真空助力器，取而代之的是踏板模拟器。它将作用在踏板上的力和速度转化为电信号，送给中央 ECU。踏板模拟器的输入输出特性曲线要很好地符合人们的驾驶习惯，并根据人体工程学设计以提高舒适性和安全性。目前已经应用的 EHB(电子液压制动系统)相对传统制动系统最大的改进就是使用了踏板模拟器，有效地提高了制动响应速度。

2 线控制动系统防抱死特性的数学描述

2.1 轮胎模型

为了便于分析，在研究制动防抱死特性时，本文作了如下简化：(1) 车轮承受的载荷为常数；(2) 不计空气阻力和滚动阻力；(3) 车轮与地面之间的纵向附着系数-滑移率关系采用双线性模型来表示，其数学表达式为：

$$\mu = \begin{cases} \frac{\mu_p}{S_p} S & 0 \leq S \leq S_p \\ \mu_p - \frac{\mu_p - \mu_s}{1 - S_p} (S - S_p) & S_p < S < 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中， $\mu_p$  为峰值附着系数； $\mu_s$  为滑移附着系数； $S_p$  为峰值附着系数  $\mu_p$  对应的最佳滑移率。

2.2 1/4 车辆模型

根据汽车在制动过程中车轮的受力情况，可写出车轮作平面运动的微分方程：

$$Mv = -F_x \quad (2)$$

$$I \dot{\omega} = R \cdot F_x - T_b \quad (3)$$

式中， $M$  为单轮载荷， $R$  为车轮滚动半径， $T_b$  为制动器制动力矩， $v$  为车辆速度， $\omega$  为车轮角速度， $F_x$  为车轮与地面的摩擦力， $I$  为车轮转动惯量。

车轮滑移率定义为：

$$S = 1 - R \cdot \omega / v \quad (4)$$

2.3 制动执行器模型

本文选用浮动盘式制动器，制动执行器结构原理如图 2 所示。制动执行器模型包括：电机模型、



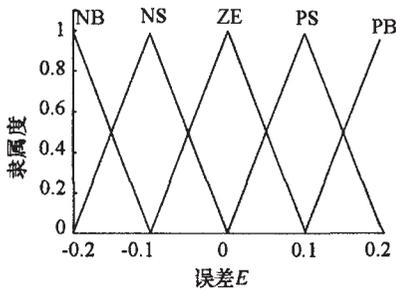


图 4 输入变量 E 隶属度函数  
Fig.4 Membership function of input variable E

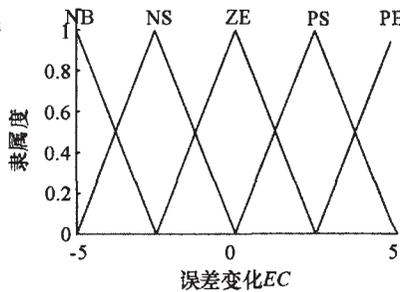


图 5 输入变量 EC 隶属度函数  
Fig.5 Membership function of input variable EC

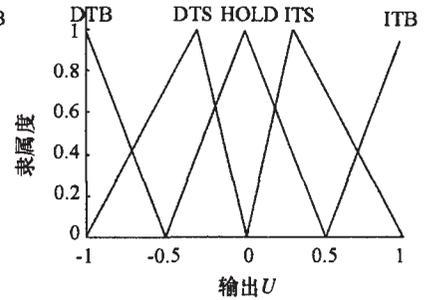


图 6 输出变量 U 隶属度函数  
Fig.6 Membership function of output variable U

以滑移率为控制对象的 ABS 模糊控制系统是较典型的双输入单输出模糊控制系统，其模糊控制规则的形式为“IF E and EC then U”。根据手动控制策略，总结出 25 条模糊控制规则，见表 1 所列。

表 1 模糊控制规则表  
Tab.1 Table of fuzzy control rules

U	EC				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	DTB	DTB	DTS	DTS	HOLD
NS	DTB	DTS	DTS	HOLD	ITS
ZE	DTS	DTS	HOLD	ITS	ITS
PS	DTS	HOLD	ITS	ITS	ITB
PB	HOLD	ITS	ITS	ITB	ITB

利用 Matlab/Simulink 进行仿真，所用车型参数为：单轮载荷 432 kg；车轮转动惯量 0.87 kg·m<sup>2</sup>；滚动半径 0.287 m；初始制动车速 20 m/s。仿真结果如图 7、图 8 所示。从仿真曲线可以看出，在线控制动系统中采用防抱死特性的模糊控制，可使车辆在 2.63 s 内减速至停车，且车轮滑移率变化平稳，保持在期望滑移率点 0.2 附近。

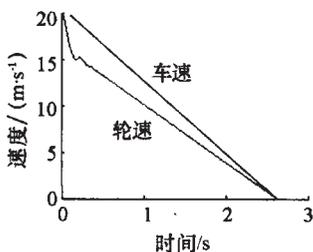


图 7 车速、轮速变化曲线  
Fig.7 Curve of vehicle and wheel speed

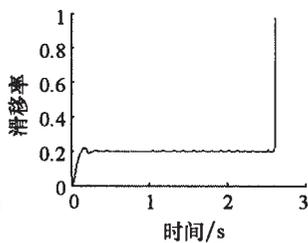


图 8 滑移率变化曲线  
Fig.8 Curve of slip ratio

#### 4 结束语

模糊控制是一种不需要系统数学模型的控制方法，特别适合于线控制动系统这种定义不完善或难以精确建模的复杂过程。

模糊控制采用类似于人脑的模糊推理方法，遵循一定的控制规则，结合实际经验，对系统进行动态调控，具有不依赖对象的数学模型、便于利用人的经验知识、鲁棒性好、简单实用等优点。

仿真结果表明，把模糊控制用于线控制动系统的防抱死特性控制，取得了理想的控制效果。模糊控制方法原理简单，容易实现，只要赋予控制器足够的控制能力，就能很好地适应路况及车型结构参数的变化，是一种很有前途的控制方法。

#### 参考文献：

- [1] SASCHA SEMMLER, ROLF ISERMANN, RALF SCHWARZ, et al. Wheel Slip Control for Antilock Braking Systems Using Brake-by-Wire Actuators [C]//SAE Paper, 2003- 01- 0325.
- [2] JAMES SCOBIE, MARK MAIOLANI, MARK JORDAN. A Cost Efficient Fault Tolerant Brake By Wire Architecture [C]//SAE Paper, 2000- 01- 1054.
- [3] MARIA BRUCE. Distributed Brake-By-Wire based on TTP/C [D]. Sweden: Lund Institute of Technology, 2002.
- [4] 熊璐, 余卓平, 张立军. 汽车电制动系统(BBW)现状和前景[J]. 上海汽车 2002, (6).
- [5] RALF SCHWARZ, ROLF ISERMANN, et al. Clamping Force Estimation for a Braking-by-Wire Actuator [C]//SAE Paper, 1999- 01- 0482.
- [6] 张猛, 宋健. 电子机械制动系统发展现状[J]. 机械科学与技术, 2005, (2).
- [7] 张文海. 用反电势系数计算直流力矩电机堵转转矩的公式 [J]. 微特电机, 2004, (4).
- [8] 郭孔辉, 王会义. 模糊控制方法在汽车防抱制动系统中的应用[J]. 汽车技术, 2000, (3).