

# 基于模糊推理和反模糊化的汽车制动器防抱死控制方法

丁仰阳

(河北省机电工程技师学院 汽车与地质工程系, 河北 张家口 075023)

**摘要:** 常规模糊 PID 控制策略下的汽车制动器防抱死技术, 能够通过模糊计算最大程度改进制动空间, 但是模糊控制过程缺少反馈规则, 导致很容易出现模糊过控制问题。利用信息感知、决策和执行模块构建制动器防抱死系统整体架构; 从车辆模型、轮胎模型和制动器模型三方面建立动力学模型; 通过非线性函数设置免疫反馈规则, 调整比例系数, 形成反模糊化规则。获得模糊免疫 PID 与反模糊化约束的控制输出; 经过模糊推理和反模糊化过程完成汽车制动器防抱死冗余自动控制。实验仿真结果表明: 所提技术在不同路面下都能降低滑移率, 减少制动时间, 缩短制动距离, 避免出现抱死冗余现象。

**关键词:** 汽车制动; 模糊推理; 反模糊化; PID 控制; 防抱死制动系统; 自动控制; 反馈规则

**中图分类号:** TP391; U463.51   **文献标志码:** B   **文章编号:** 1671-5276(2023)04-0217-04

## Anti-lock Control Method of Automobile Brake Based on Fuzzy Reasoning and Anti-fuzzy

DING Yangyang

(Automobile and Geological Engineering Department, Hebei Province Mechanical and Electrical Engineering Technician College, Zhangjiakou 075023, China)

**Abstract:** Although the anti-lock technology of automobile brake under the conventional fuzzy PID control strategy can improve the braking space to the greatest extent through fuzzy calculation, the fuzzy control process lacks feedback rules, which leads to the problem of fuzzy over control. The information perception, decision-making and execution modules are used to build the overall architecture of the brake anti lock system. The dynamic model is established in terms of vehicle model, tire model and brake model. The immune feedback rule is set through the nonlinear function, and the proportional coefficient is adjusted to form the anti fuzzification rule. The control output of fuzzy immune PID and anti fuzzy constraints is obtained. Through the process of fuzzy reasoning and defuzzification, the anti-lock redundant automatic control of automobile brakes is completed. The simulation results show that the experimental results show that the proposed technology can reduce slip rate, shorten braking time and distance and avoid locking redundancy.

**Keywords:** automobile brake; fuzzy reasoning; defuzzification; PID control; anti-lock braking system; auto-control; feedback rules

## 0 引言

汽车防抱死制动系统(anti-lock braking system, ABS)是一种安全装置,结合滑移率的变化,调整制动压力,在紧急制动情况下防止车轮抱死现象,获取最优制动效能,增强驾驶安全性。该系统的具体优势如下:缩小制动范围,当汽车在路况不佳的路面上行驶时,通过较高的制动效能,避免车辆甩尾;改善方向稳定性,将附着系数调整到较高值时,可避免车轮完全抱死,提高横向承受力;减轻轮胎磨损,避免制动时产生拖痕,延长轮胎使用年限;缓解驾驶员疲劳度。

为提高制动能力,ABS 通常需要使用可靠的控制技术。现阶段,逻辑门限方法应用较为广泛,但是控制逻辑复杂,且 ABS 本身属于非线性系统,增加了控制难度。针对上述问题,相关学者给出如下解决方案。文献[1]研究一种基于混合控制的制动器控制技术。利用电液盘制

器设置制动系统,定义该系统的成本函数和控制系统的误差函数;通过模糊神经网络算法改进传统 PID 控制算法,确定混合控制流程。文献[2]利用动态规划策略设计一种联合制动控制方法,使用遗传算法优化模糊控制器,将制动器升温最低作为目标,设置联合制动策略,对制动力矩进行合理分配,达到稳定控制的目的。

上述方法虽然操作逻辑简单,但是响应速度较慢,制动距离也有待进一步缩小。为了更好地实现制动器防抱死冗余控制,很多人提出基于模糊 PID(比例-积分-微分)的自动控制技术。模糊算法的最大优势是无需构建数学模型,模型结构简单且具备智能化特征<sup>[3]</sup>。但是,模糊算法仅仅体现在控制过程中,缺少必要的反向约束条件,导致很容易出现过控制的问题,出现稳态误差。

基于模糊推理和反模糊化的汽车制动器防抱死控制方法可避免算法使用中的稳态误差。利用该方法设置模糊控制器,设定反模糊化的制约规则,推理获得控制器的输出,通过输出值即可实现对 ABS 系统的防抱死冗余控制。

# 1 控制器防抱死系统动力学建模

## 1.1 ABS 系统整体架构

在 ABS 系统中,信息感知、决策与执行是 3 个重要模块<sup>[4]</sup>。感知模块主要作用是通过传感器采集车辆行驶速度;决策模块是控制器根据感知信息进行数学建模,计算最佳滑移率出现时的制动力矩;执行模块是按照决策过程中计算的力矩对车辆控制。系统整体架构如图 1 所示。

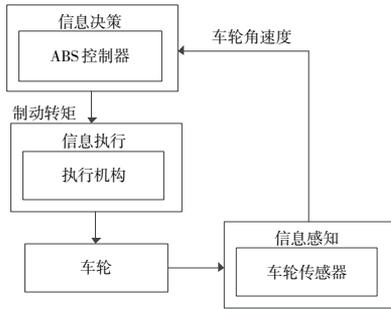


图 1 ABS 系统整体架构图

控制单元、传感器、调节器和控制电路是该系统的重要部件。在使用中,控制单元根据传感器获取轮速信号,判断是否发生抱死现象,并将判断指令发送到调节装置,通过保压、减压和增压等不同形式控制制动力<sup>[5]</sup>。

## 1.2 ABS 系统动力学建模

ABS 系统的动力学模型由车辆、车轮和制动器模型构成。建模过程中将车辆看作刚体,根据牛顿定律构建模型<sup>[6]</sup>。轮胎模型则通过理论模型建模,具有过程简洁、计算方便等优势,同时综合考量不同方向的滑移和横摆力矩。制动器模型是描述力矩和液压力的关系模型。

### 1) 车辆模型

分析车辆运动学原理,在模型构建之前需要做出如下假设。

假设 1:路面光滑,车身的位移、俯仰角与倾斜角均为 0,车辆只做平面运动,泊车没有出现侧滑情况,无需分析车辆垂直运动,不考虑悬架作用。

假设 2:汽车是由 6 个刚体构成的复杂系统,刚体间存在约束关系,建模过程中将前轮角视为输入,忽略阻尼器和转向系统的影响。

假设 3:构建准坐标系,并固定在底盘上。

假设 4:驱动力较小,不考虑轮胎侧偏特征和空气动力作用。

车辆行驶过程中受摩擦力、制动器释放力和阻力等因素影响。结合车辆和轮胎的关系,第  $i$  轴上车轮  $j$  的纵向和横向速度计算公式如下:

$$p(i, j) = B(i) \frac{r}{2} \quad (1)$$

$$q(i, j) = \frac{L}{\pi} \quad (2)$$

式中: $B(i)$  为第  $i$  轴的轮距; $L$  为车辆轴距; $r$  为车轮半径。

### 2) 轮胎模型

轮胎模型通常用附着系数和各类参数之间的关系来描述。轮胎要承受车身质量和路面冲击,对车辆起到缓冲作用。

理论模型描述车辆运行中受到的纵向、横向等受力过程。其中,纵向滑移率公式如下:

$$S = \frac{V_x - V_c}{V_x} \quad (3)$$

式中  $V_c$  与  $V_x$  分别代表轮胎圆周和汽车纵向速度。

横向滑移率计算公式如下:

$$Z = \frac{|\tan \alpha|}{V_y} \quad (4)$$

式中: $\alpha$  代表车轮偏角; $V_y$  代表汽车横向行驶速度。

### 3) 制动器模型

建模过程中,假定制动器属于理想元件<sup>[7]</sup>,不考虑非线性特征,其制动力矩表达式如下:

$$M_b = \frac{F_p}{F(t) F_m} \quad (5)$$

式中: $F_p$  为能效因数; $F(t)$  为制动缸压力; $F_m$  为制动延时。

至此,已完成 ABS 系统的动力学建模,将该模型作为依据,能获得更好的控制效果。

## 2 反模糊化的反馈控制规则设定

结合免疫算法的反馈相关原理,做出如下假定:假设第  $N$  代抗原个数是  $\alpha(t)$ ,辅助细胞  $T_h$  的输出表示为

$$T_h(t) = d_1 \alpha(t) \quad (6)$$

式中  $d_1$  为激励因子。如果抑制细胞和 A 细胞之间存在的关系表示为

$$T_s(t) = d_2 f(\Delta \alpha(t)) \quad (7)$$

式中: $d_2$  为抑制因子; $f(\cdot)$  为非线性函数。则 A 细胞的刺激公式如下:

$$S(t) = T_h(t) - T_s(t) = d_1 [\lambda f(\Delta \alpha(t))] \quad (8)$$

式中  $\lambda = \frac{d_2}{d_1}$ ,代表细胞刺激影响因子。

结合免疫算法反馈机制,调节比例系数,将输出变量作为比例系数输入<sup>[8]</sup>。则控制器的比例环节能结合输出值与变化速度实现自适应调整,其反馈控制规律表示为

$$y(t) = d_1 [1 - \eta f(y(t))] e(t) = k_{p1} e(t) \quad (9)$$

式中: $k_{p1}$  为比例系数; $e(t)$  为控制误差; $d_1$  为影响控制器的响应速度; $\eta$  为系统稳定时的控制量,取值范围是  $0 \leq \eta \leq 1$ 。由此确定反模糊化控制器的输出表示为

$$y(t) = y(t-1) + k_{p1} [e(t) - e(t-1)] + k_i e(t) + k_d e(t) \quad (10)$$

式中  $k_i$  和  $k_d$  分别代表积分和微分控制系数。

## 3 防抱死冗余自动控制技术

制动器防抱死冗余自动控制由模糊免疫 PID 控制技术设置控制器实现<sup>[9]</sup>。结合上述设定参数和反模糊化规则,确定输入与输出等参量,选择主要变量,构建模糊集合

和隶属函数,建立控制器结构。

设计的控制器包括下述三部分。

1) 模糊化

非线性函数 $f(\cdot)$ 的模糊过程如下:对输入与输出变量模糊处理, $x$ 代表真实输入变量, $x'$ 代表模糊语言变量,设定模糊论域是 $[-1,1]$ ,在该论域中,将 $x$ 与 $x'$ 变换为模糊量,即正大(PB)与负大(NB)。任意输入量 $x(t)$ 与 $\Delta x(t)$ 均可利用线性变换在论域中转换,控制器的输出值为 $f(x, \Delta x)$ 。

2) 模糊推理

结合 ABS 系统的相关控制经验,控制器应按照如下规则工作:

当滑移率误差较小时,误差变化率随之减小,车轮角速度的变化幅度较小;

当滑移率误差适中时,误差变化率适中,角速度变化幅度适中;

当滑移率误差非常大时,误差变化率随之增大,角速度的变化幅度较大。

利用 $\{NB, NS, ZE, PS, PB\}$ 表示滑移率误差、误差变化率的模糊集合,其中各类元素对应 $\{$ 负大,负小,零,正小,正大 $\}$ 。利用 $\{NB, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ 描述车轮角速度的变化情况,这些元素分别对应 $\{$ 负大,负小,零,正小,正中,正大 $\}$ 。模糊规则如表 1 所示。

表 1 模糊规则表

$x$	$x'$				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NS	NB	PS	PB	PB
NS	NB	NB	NS	PB	NB
ZE	NB	NS	NS	PM	ZE
PS	ZE	PM	ZE	PM	ZE
PB	PS	PB	ZE	PB	PB

3) 反模糊处理

通过面积重心法实现反模糊化,核心是计算隶属函数与横坐标覆盖区域面积的中心,将计算结果作为集中具有代表性的值<sup>[10]</sup>。

假设论域  $U$  中集合  $R$  的隶属函数表示为  $R(u)$ ,  $u \in U$ ,其面积中心横坐标为  $U_{cen}$ ,则计算公式如下:

$$U_{cen} = \int_U R(u) du \quad (11)$$

通过上述控制技术即可实现控制器的有效控制,能更好地控制 ABS 系统,避免出现抱死现象。

## 4 仿真与结果分析

### 4.1 仿真准备

1) 测试对象

将某小型轿车作为测试对象,车辆相关参数如表 2 所示。

表 2 车辆相关参数表

参数名称	数值
重力加速度/( $m/s^2$ )	9.8
初始速度/( $m/s$ )	30
车轮滚动半径/ $m$	0.28
转动惯量/( $kg/m^2$ )	25
制动器动力因素/ $N$	25
制动压力区间/ $kPa$	0~800

在仿真软件中搭建测试平台,整体架构如图 2 所示。

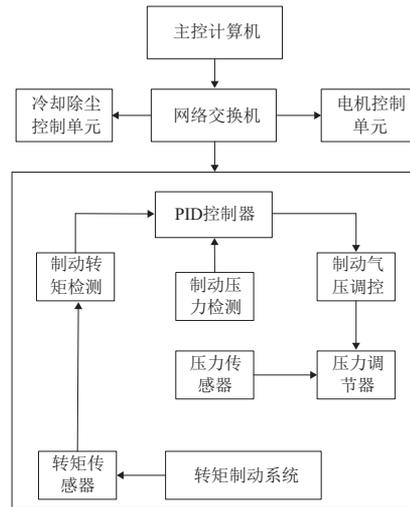


图 2 平台整体架构图

图 2 所示的平台以下位机作为基本硬件,上位机为主控计算机。制动控制器将实测值和目标值对比的结果结合,输出控制量,确保制动转矩始终平衡。下位机将获取的信息,利用交换机与主机通信,接收输入指令,便于更好地完成仿真测试。

在图 3 所示的防抱死仿真模型中,小型轿车以 30 m/s 的初始速度进入防抱死制动状态,分别在附着系数为 0.8 的沥青路面和附着系数为 0.2 的泥土路面两种路面上进行仿真测试。以滑移率和制动距离为指标,分别对比本文方法、文献[1]混合控制算法和文献[2]动态规划策略的控制效果。

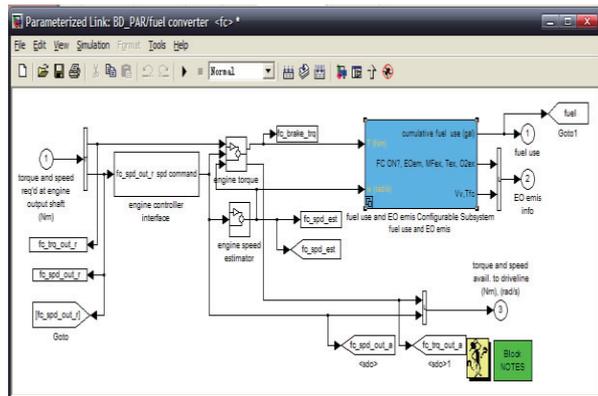
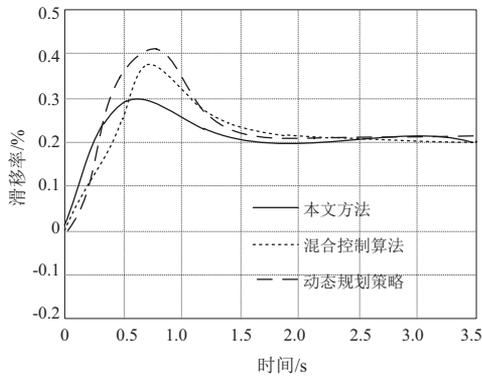


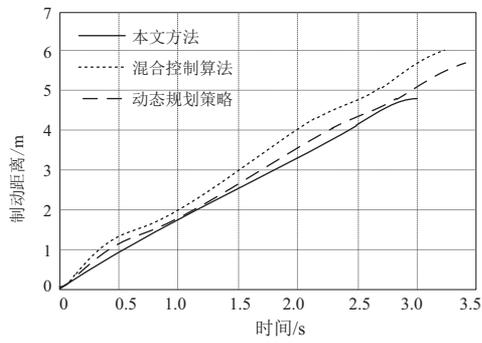
图 3 防抱死仿真模型

### 4.2 结果分析

对比本文方法、混合控制算法和动态规划策略,分析不同算法控制下车辆的滑移率和制动距离,得到的结果如图4和图5所示。

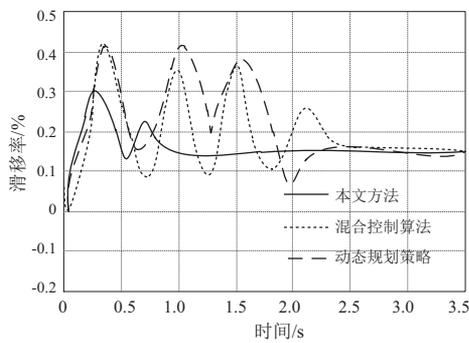


(a) 滑移率测试结果

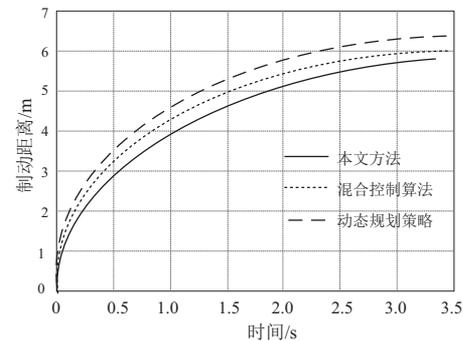


(b) 制动距离对比结果

图4 沥青路面不同算法控制效果图



(a) 滑移率测试结果



(b) 制动距离对比结果

图5 泥土路面不同算法控制效果图

由图4可知,在沥青路面行驶时,本文方法在1.5s时滑移率达到平稳,即最佳状态,其他方法的滑移率在2.5s左右才逐渐平稳,且仍有上下波动的趋势;模糊免疫PID控制算法的制动时间为3s,制动时间最短,制动距离大约为4.8m。由此可知,在高附着路面上本文方法的响应速度更快,可以确保车辆刹车距离更短,制动过程中安全系数最高。

由图5(a)可知,在低附着的泥土路面上,本文方法在1s左右时滑移率达到最佳,之后滑移率没有出现明显波动,其他两种控制方法滑移率波动较大,2.5s左右才趋于平稳。图5(b)显示,本文方法的制动距离依然最短,刹车所需时间最短,避免制动器抱死现象发生。

综上所述,模糊免疫PID控制方法有很好的控制效果,是因为该方法根据被控对象的动力学模型,构建控制器,模糊算法与免疫算法相结合时改善了响应的滞后性,提高控制效率,使控制过程更加平稳。

### 5 结语

ABS系统由多个子系统共同作用,控制系统性能决定系统安全性。为此,结合免疫算法与模糊PID方法,设置一种控制器,包括模糊化、推理和反模糊化3个部分。结果表明,无论高附着还是低附着路面都具有很好的控制性能,制动时间短,滑移率较低,避免抱死现象出现。但是,ABS系统还需要不断完善,例如增强自诊断功能,提高安全性;在控制器中可以添加通信模块,例如牵引力和巡航系统通信等。

#### 参考文献:

- [1] 张启森,朱斌. 基于混合控制的电动汽车电液盘式制动器控制研究[J]. 中国工程机械学报,2020,18(6):549-554.
- [2] 兰海潮,马宗钰,李学博,等. 基于动态规划的电动商用车下坡联合制动控制策略[J]. 西北大学学报(自然科学版),2020,50(6):987-995.
- [3] 刘振波,闫玉峰. 采用电液盘式制动器的电动汽车制动模型预测控制研究[J]. 机床与液压,2020,48(20):66-70.
- [4] 詹斌,孙涛,沈炎武,等. 基于复特征值分析的某盘式制动器制动尖叫问题改进[J]. 振动与冲击,2021,40(5):108-112,135.
- [5] 王志伟,张杨. 基于ABAQUS汽车盘式制动器粘滑非线性动力学行为研究[J]. 现代制造工程,2020(10):62-69.
- [6] 竺元昊,范伟军,郭斌,等. 汽车气压盘式制动器性能在线检测系统研制[J]. 中国测试,2020,46(10):138-143.
- [7] 李俊玲,赵海波. 多目标捕获算法的红外感应型汽车自动制动系统[J]. 机械设计与制造,2020(12):248-251.
- [8] 余卓平,史彪飞,熊璐,等. 某分布式驱动电动汽车复合制动策略设计[J]. 汽车技术,2020(2):12-17.
- [9] 班小强,覃桂全. 半主动空气悬架BP-PID控制器设计及其随机路面验证[J]. 机械制造与自动化,2022,51(3):217-219,235.
- [10] 赵广元,王超. 基于改进人群搜索算法的PID控制器参数优化[J]. 计算机仿真,2020,37(8):302-305,310.

收稿日期:2022-08-28