

汽车防抱制动系统自适应模糊控制算法

晏蔚光 余达太 李果 毋茂盛 张卫冬

北京科技大学信息工程学院, 北京 100083

摘要 提出了一种基于自适应模糊算法的防抱制动系统控制方式. 针对汽车纵向双轮模型, 设计了模糊控制器和滑移率校正器. 校正器通过车辆的输入输出参数辨识最佳滑移率, 并调整系统控制参数, 以提高系统的控制性能. 仿真实验验证了控制算法的有效性.

关键词 防抱制动系统; 滑移率; 模糊控制; 自适应

分类号 TP 273; U 463.5

汽车防抱制动系统 (ABS) 是一种在紧急制动情况下缩短汽车制动距离, 同时保持汽车方向稳定性的装置. 它在各种车辆上已经得到广泛应用, 并成为汽车主动安全控制的一个重要研究方向. 目前, 逻辑门限值控制算法是应用最广泛的控制技术. 这种控制方式不涉及控制数学模型, 系统实时响应速度快, 与其他控制方式相比有很大的优势. 但是, 它的控制逻辑复杂, 调试困难, 控制不够稳定, 其开关控制方式使制动系统不能连续利用地面的最大附着力.

近几年, 模糊控制成为国内外 ABS 控制算法研究的一个热点^[1-4]. 模糊控制不需要控制对象的精确数学模型, 响应速度快, 超调量小, 对制动器具体参数的敏感性降低, 具有较好的鲁棒性和灵活性. 但是普通模糊控制本身消除系统稳态误差的性能比较差, 控制参数需要经过反复的实验来确定. 同时, 由于各种路面的峰值附着系数和最佳滑移率都不相同, 简单的模糊控制也很难满足防抱制动系统对各种路况适应性的要求. 因此, 本文提出了一种基于自适应模糊控制的 ABS 控制算法, 在模糊控制器中增加了输入调整因子以改善系统的响应特性, 设计了滑移率校正器以提高对各种路面的适应能力, 进一步缩短制动距离.

1 汽车制动的动力学模型

纵向附着系数与滑移率之间的关系采用双线性模型来表示. 其函数可表示为:

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

其中, μ_p 为峰值附着系数, μ_s 为滑移附着系数, λ_p 为峰值附着系数 μ_p 对应的最佳滑移率.

设转向角为 0° , 忽略空气阻力、滚动阻力和悬架系统的影响, 仅考虑汽车的纵向运动, 建立汽车的纵向双轮模型, 如图 1 所示. m 为汽车质

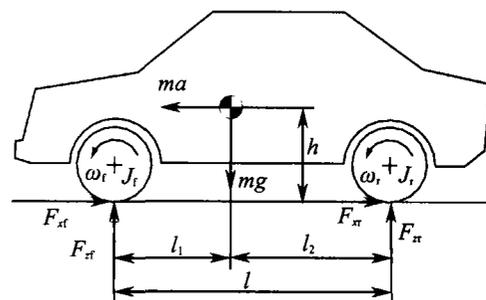


图1 汽车制动的纵向双轮模型

Fig.1 Longitudinal vehicle brake model

量, h 为汽车重心距地面的高度, l_1, l_2 为重心到前轮和后轮的距离, ω_1, ω_2 分别为前、后轮的角速度, J_1, J_2 为前、后轮传动系等效到车轮上的等效转动惯量, F_{x1}, F_{x2}, T_1, T_2 分别为前、后轮载荷以及与前、后轮之间的纵向摩擦力, T_1, T_2 为制动器作用在前、后轮上的制动力矩, μ_1, μ_2 为前后轮的纵向附着系

数, 车轮有效半径为 R .

取汽车前进方向为汽车所受地面制动力 F_x , 汽车位移 x 、速度 v 和加速度 a 的正方向, 逆时针方向为车轮角速度 ω_b, ω_r 的正方向. 令状态变量 $x_1 = x, x_2 = \dot{x}_1, x_3 = \omega_b, x_4 = \omega_r$, 得到汽车制动时的状态空间方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{\mu l_2 + \mu l_1}{\mu h - \mu l_1 - l_1 - l_2} g \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{J_f} \left[\frac{\mu m R}{l_1 + l_2} (g l_2 - \ddot{x} h) - T_f \right] \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{J_r} \left[\frac{\mu m R}{l_1 + l_2} (g l_1 - \ddot{x} h) - T_f \right] \end{cases} \quad (2)$$

输出方程为:

$$y = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \lambda_f \\ \lambda_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ v \\ v - \omega_b R \\ v - \omega_r R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_2 - x_3 R \\ x_2 - x_4 R \end{pmatrix} \quad (3)$$

方程 (2) 和方程 (3) 即组成汽车制动的状态空间方程.

2 模糊控制器

模糊控制器选取滑移率误差 E 和误差变化率 E_c 为输入参数, 取制动力矩增量 Δu 为输出参数. 模糊语言值分别为:

误差 E : {负大, 负小, 零, 正小, 正大},

误差变化率 E_c : {负大, 负小, 零, 正小, 正大},

制动力矩增量 Δu : {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}.

按照模糊语言值划分论域, 得到各输入输出的隶属函数, 如图 2 所示. 隶属度函数采用三角形, 在误差较小的区域采用高分辨率的模糊集, 以提高控制的灵敏度; 在误差较大的区域采用低分辨率的模糊集, 使系统具有较好的稳定性.

模糊推理的形式为:

$$\text{IF } E = A, \text{ AND } E_c = B, \text{ THEN } \Delta u = C,$$

其中, A 为误差模糊子集, B 为误差变化模糊子集, C 为输出量模糊子集. 根据调试经验得到模糊规则表, 如表 1 所示. 解模糊采用 MIN-MIX-重心法. 重心的计算公式为:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n u_c(z_i) \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n u_c(z_i)} \quad (4)$$

量化因子 k_e 和 k_c 的大小意味着对输入变量误

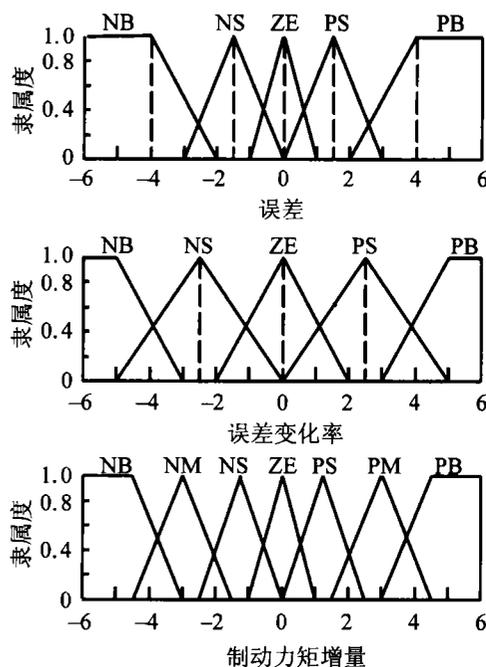


图 2 各输入输出的隶属函数

Fig.2 Membership functions of inputs and outputs

表 1 模糊控制规则表

Table 1 Fuzzy control rules

E_c	E				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NM	ZE	PS
NS	NB	NB	NS	PS	PM
ZE	NB	NB	ZE	PS	PB
PS	NB	NM	ZE	PM	PB
PB	NB	NM	ZE	PM	PB

差和误差变化的不同加权程度, 不同的系统特性需要选取不同的 k_e 和 k_c 以获得满意的控制效果. 然而, 防抱死制动系统是一种参数不确定的非线性系统, 轮胎与路面的附着系数、附着系数的变化率等都随着路况的改变而改变. 为了使控制器具有良好的控制性能, 在模糊控制算法中引入调整因子 α . 调整因子 α 设计为:

$$\begin{cases} \alpha_e = \frac{|E|}{|E| + |E_c|} \\ \alpha_c = \frac{|E_c|}{|E| + |E_c|} \end{cases} \quad (5)$$

其中, E 和 E_c 分别为误差和误差变化率的模糊值.

调整因子 α_e 作用于误差输入通道, α_c 作用于误差变化率输入通道. α 是滑移率误差及误差变化率绝对值的加权函数, 误差相对误差变化率越大, 对误差的加权越大; 反之误差相对误差变化率越小, 对其的加权则越小.

3 滑移率校正器

考虑各种路面最佳滑移率的不同,为增加控制系统的稳定性以及充分利用路面的最大附着系数,需要在控制过程中识别路面的最佳滑移率,并调整系统设定的期望滑移率.

前、后轮的动力学方程为

$$\begin{cases} J_f \dot{\omega}_f = -F_{x_f} R - T_f \\ J_r \dot{\omega}_r = -F_{x_r} R - T_r \end{cases} \quad (6)$$

则有

$$\dot{v} = \frac{1}{m}(F_{x_f} + F_{x_r}) = -\frac{1}{mR}(J_f \dot{\omega}_f + T_f + J_r \dot{\omega}_r + T_r) \quad (7)$$

以前轮为研究对象,制动时前轮载荷为:

$$F_{x_f} = \frac{mg}{l}(l_2 - \frac{v}{g}h) \quad (8)$$

考虑式(6)和(8),前轮附着系数为:

$$\mu_f = -\frac{F_{x_f}}{F_{z_f}} = \frac{l}{mR} \frac{J_f \dot{\omega}_f + T_f}{gl_2 - \dot{v}h} \quad (9)$$

式(9)对时间求一阶导数,

$$\frac{d\mu_f}{dt} = l \frac{(J_f \ddot{\omega}_f + \dot{T}_f)(gl_2 - \dot{v}h) + \dot{v}h(J_f \dot{\omega}_f + T_f)}{mR(gl_2 - \dot{v}h)^2} \quad (10)$$

前轮滑移率 $\lambda_r = 1 - \omega_f R / v$ 对时间求一阶导数,

$$\frac{d\lambda_r}{dt} = \frac{1}{v^2}(\dot{v}\omega_f R - v\dot{\omega}_f R) = \frac{1}{v}[(1 - \lambda_r)\dot{v} - \dot{\omega}_f R] \quad (11)$$

当 $d\lambda_r/dt \neq 0$, 即 $(1 - \lambda_r)\dot{v} - \dot{\omega}_f R \neq 0$ 时,

$$\frac{d\mu_f}{d\lambda_r} = \frac{d\mu_f/dt}{d\lambda_r/dt} \quad (12)$$

将式(10),(11)代入,得

$$\frac{d\mu_f}{d\lambda_r} = \frac{l}{mR} \frac{vp}{q} \quad (13)$$

其中,

$$\begin{aligned} p &= (J_f \ddot{\omega}_f + \dot{T}_f)(gl_2 - \dot{v}h) + \dot{v}h(J_f \dot{\omega}_f + T_f), \\ q &= (gl_2 - \dot{v}h)^2 [(1 - \lambda_r)\dot{v} - \dot{\omega}_f R] \end{aligned} \quad (14)$$

在车轮滑移率等于最佳滑移率时附着系数最大, $d\mu_f/d\lambda_r = 0$. 由条件可知, $d\lambda_r/dt \neq 0$, $F_{x_f} \neq 0$, 因此 $q \neq 0$. 且汽车制动时, $v \neq 0$, 所以 $p = 0$ 时的滑移率对应最大附着系数.

考虑式(7)和(14),最后整理得到:

$$p = (J_f \ddot{\omega}_f + \dot{T}_f)gl_2 + \frac{h}{mR} [(J_f \ddot{\omega}_f + \dot{T}_f)(J_f \dot{\omega}_f + T_f) - (J_f \dot{\omega}_f + T_f)(J_f \ddot{\omega}_f + \dot{T}_f)] \quad (15)$$

当设定的期望滑移率低于最佳滑移率时,控制系统会将控制目标稳定在期望滑移率上,滑移率变化率 $\dot{\lambda}$ 及滑移率的二阶导数 $\ddot{\lambda}$ 都为0. 此时,需要激发滑移率校正器,使期望滑移率向最佳滑移率靠近. 调节器选取 $\dot{\lambda}$ 作为激发条件,考虑到路面情况等对 $\dot{\lambda}$ 的干扰,在计算 $\ddot{\lambda}$ 时,需要进行滤波处理. 校正器增大期望滑移率的判定条件为:

$$|\ddot{\lambda}| < \ddot{\lambda}_r \quad (16)$$

式中, $\ddot{\lambda}_r$ 为滑移率二阶导数的门限值. 自适应模糊

控制 ABS 的系统结构如图3所示.

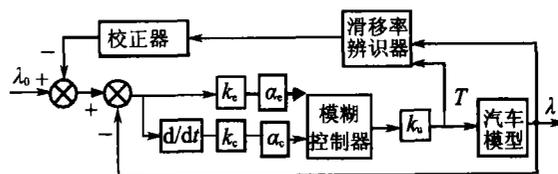


图3 自适应模糊控制 ABS 的系统结构框图

Fig.3 Schematic of the adaptive fuzzy control system of ABS

4 自适应模糊控制 ABS 仿真

仿真实验采用的汽车模型基本参数为 $m = 1065$ kg, $h = 0.57$ m, $l_1 = 0.95$ m, $l_2 = 1.56$ m, $r = 0.31$ m, $J_f = 1.014$ kg·m², $J_r = 1.014$ kg·m². 图4,图5分别为采用常规模糊控制算法和自适应模糊控制算法控制 ABS 的仿真结果.

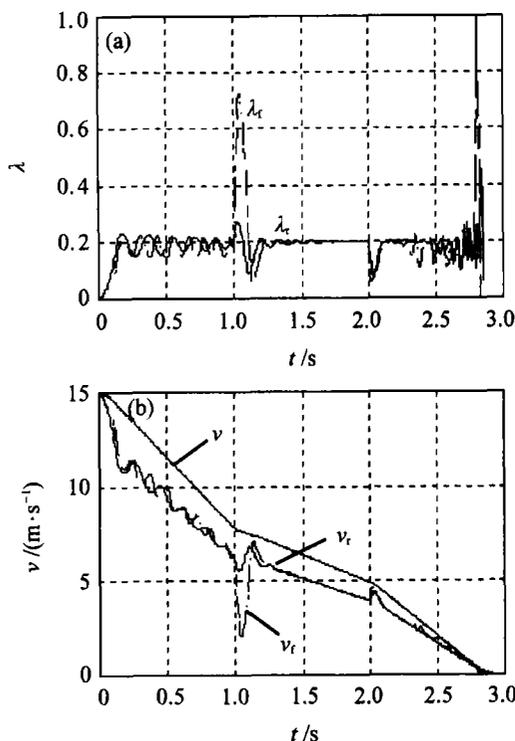


图4 常规模糊控制方式的仿真结果。(a) 滑移率曲线, (b) 车速和轮速曲线

Fig.4 Simulation results of the fuzzy control mode

仿真实验初始车速为 $v_0 = 54$ km/h (15 m/s), 汽车模型先后通过三种路面,路面情况分别为 L_1 ($\mu_p = 0.8, \lambda_p = 0.1$), L_2 ($\mu_p = 0.3, \lambda_p = 0.2$) 和 L_3 ($\mu_p = 0.6, \lambda_p = 0.15$), 控制系统设定的初始期望滑移率 $\lambda_0 = 0.2$.

两种控制方式的制动距离分别为 $x_1 = 20.027$

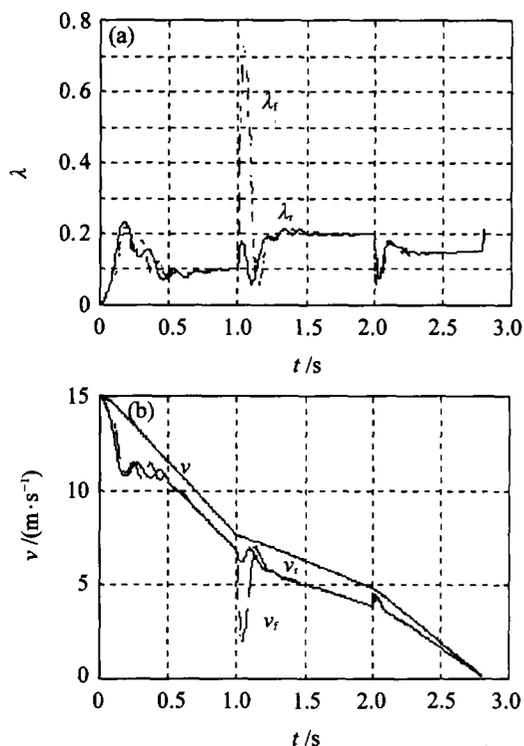


图5 自适应模糊控制方式的仿真结果。(a) 滑移率曲线, (b) 车速和轮速曲线

Fig.5 Simulation results of the adaptive fuzzy control mode

$m, x_2 = 19.794 \text{ m}$. 从仿真结果可以看出, 自适应模糊控制方式可以更好地提高控制目标的收敛速度, 提高控制系统的稳定性, 进而缩短防抱制动系统的制动距离.

5 结论

模糊控制器通过调整因子修正自身参数, 改善了控制性能, 提高了控制系统的响应速度和稳态精度. 滑移率校正器根据系统运动状态自动调节系统的期望滑移率, 提高了控制系统的稳定性. 将自适应模糊控制用于防抱制动系统, 可以增强防抱制动系统对各种路况的自适应能力, 进一步缩短制动距离.

在建立数学模型时忽略了汽车及路况存在的一些非线性因素, 在今后的研究工作中将对数学模型和控制算法进行修正, 并将通过实验来验证以上提出的控制算法.

参 考 文 献

- 1 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): 7
- 2 赵治国, 方宗德. 防抱死制动系统模糊自学习控制研究 [J]. 汽车工程, 2002, 26(6): 474
- 3 Anthony B Will, Stanislaw H Zak. Antilock brake system modeling and fuzzy control [J]. Veh Des, 2000, 24(1): 1
- 4 Chen F W, Liao T L. Nonlinear linearization controller and genetic algorithm-based fuzzy logic controller for ABS systems and their comparison [J]. Int J Veh Des, 2000, 24 (4): 334

Fuzzy Adaptive Control Algorithm for Antilock Brake Systems

YAN Weiguang, YU Datai, LI Guo, WU Maosheng, ZHANG Weidong

Information Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

ABSTRACT An adaptive fuzzy control algorithm for antilock brake systems was presented. An adaptive fuzzy controller and a slip regulator were designed according to the longitudinal vehicle brake model. The optimal slip ratio was identified from the input and output parameters of vehicles, and the control parameter of the systems was adjusted by the slip regulator to improve the performance of the control systems. The algorithm was verified by simulation experiments.

KEY WORDS antilock brake system; slip ratio; fuzzy control; adaptive