

电动车制动防抱死自适应鲁棒控制系统¹⁾

李 果 余达太

(北京科技大学信息工程学院 北京 100083)
(E-mail: guo6396@sina.com)

摘 要 为了改善电动车的可操作性和稳定性, 本文进行电动车制动防抱死控制系统的研究. 首先针对汽车纵向四轮模型, 设计自适应鲁棒控制器. 所提出的自适应控制器和自适应鲁棒控制律不仅保证了闭环系统的稳定性, 而且实现了所期望的性能. 然后通过试验结果证明了控制算法的有效性. 尽管道路条件的变化不同, 电动车制动防抱死控制系统表现出满意的控制性能.

关键词 制动防抱死系统, 自适应鲁棒控制, 电动车
中图分类号 TP273

The Adaptive Robust Controller of Antilock Brake System of Electric Vehicles

LI Guo YU Da-Tai

(Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083)
(E-mail: guo6396@sina.com)

Abstract This paper investigates the use of antilock brake control system for improving handling and stability of electric vehicles. An adaptive robust controller of antilock brake control system is designed according to the longitudinal vehicle brake model. The proposed adaptive controller and the corresponding robust adaptive law can not only keep the closed-loop system robustly stable but also provide the expected performance. The effectiveness of the algorithm is verified by the experimental results. It is shown that the handling and stability of electric vehicle is improved and the control system still maintains satisfactory control performance despite the change of road surface condition.

Key words Antilock brake system (ABS), adaptive robust control, electric vehicle

1 引言

随着汽车动力性能的不不断提高, 客观上对汽车制动安全性能提出了越来越高的要求. 为了对速度不断提高的汽车提供充足的制动力, 人们不断地改进制动器. 然而, 由于汽车运动状态的复杂性和车轮与地面的之间附着力的非线性等原因, 当汽车在高速行驶中制动或在弯道上紧急制动以及在冰雪路面等复杂路况下制动时, 经常出现车轮因抱死拖滑而导致制动距离加长, 同时还有车身侧滑调头、失去方向控制能力等现象, 严重威胁汽车、乘客和行人的安全. 汽车制动防抱死系统 (ABS) 是一种在紧急制动情况下使汽车制动距离尽可能短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

1) 国家开发总公司和北京科技大学资助

Supported by National Development Corporation and Beijing University of Science and Technology

收稿日期 2005-8-16 收修改稿日期 2005-12-9

Received August 16, 2005; in revised form December 23, 2005

车主动安全控制的一个重要研究方向. 从 20 世纪 80 年代开始, ABS 在欧洲商用汽车上迅速普及. 90 年代以后, ABS 技术在欧洲、美国和日本都得到快速发展, 并成为多种客车和轻型车的标准或选装设备. 虽然 ABS 技术已经发展多年, 但仍存在一些不如意的地方. 目前出于安全考虑, 汽车制动系统在设计时后轴制动器输出力矩在一定范围内低于理想的制动力矩, 这在客观上延长了汽车的制动距离; ABS 制动液压系统在工作过程中表现的延滞和非线性特性影响了 ABS 控制效果; 同时, 在控制方法上, ABS 目前大多采用逻辑门限值控制算法, 这种控制方式控制不平滑, 不够稳定, 精度低. 控制逻辑比较复杂, 调试困难. 并且已经开发完成 ABS 装置对各种车型的互换性差.

本文在两轮汽车的纵向制动模型的基础上^[1~4], 提出了电动车的纵向四轮制动模型. 而后设计一种基于自适应鲁棒控制控制的 ABS 控制系统, 它对控制对象中具体参数变化的敏感性较低, 具有较好的鲁棒性, 提高对各种路面的适应能力, 缩短制动距离, 实现电动车方向操纵稳定. 本文所提出的控制算法在电动 ABS 试验平台上进行了试验, 试验结果验证了这种方法的有效性.

2 电动车制动动力学模型

设转向角为零, 忽略空气阻力, 滚动阻力和悬架系统的影响, 仅考虑电动车沿纵轴线的运动, 建立电动车的纵向四轮制动模型, 如图 1 所示. 图 1 中 m 为电动车质量, h 为电动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_{f1}, ω_{f2} 分别为电动车前左和前右轮的角速度. ω_{r3}, ω_{r4} 分别为电动车后左和后右车轮的角速度. I_{f1}, I_{f2} 分别为电动车前左车轮和前右车轮的转动惯量. I_{r3}, I_{r4} 是后左、后右的车轮转动惯量. T_{f1}, T_{f2} 是前左车轮和前右车轮上的制动力矩. T_{r3}, T_{r4} 是后左车轮和后右车轮上的制动力矩, 车轮有效半径为 r . $u(S_{f1}), u(S_{f2})$ 是前左车轮和前右车轮的纵向附着系数. $u(S_{r3}), u(S_{r4})$ 是后车轮的纵向附着系数, S 是滑移率, $u(S)$ 是一个非线性时变函数. 取电动车前进方向时的电动车位移 x , 速度 v 和加速度 a 为正. 可以得到电动车纵向四轮制动模型.

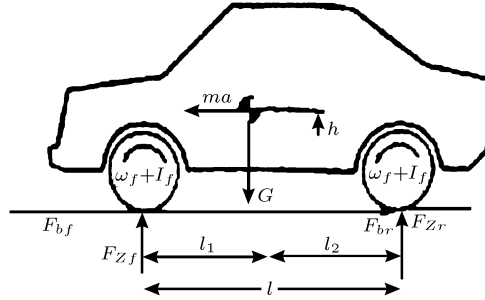


图 1 制动时作用在电动车上的力

Fig. 1 Antilock brake electric vehicle

设 $x_1 = x, x_2 = \dot{x} = v, x_3 = \omega_{f1}, x_4 = \omega_{f2}, x_5 = \omega_{r3}, x_6 = \omega_{r4}$, 有

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, & \dot{x}_2 &= \frac{u(S_{f1}) + u(S_{f2})l_2 + (u(S_{r3}) + u(S_{r4}))l_1}{l - (u(S_{f1}) + u(S_{f2}))h + (u(S_{r3}) + u(S_{r4}))h} g \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{I_{f1}} \left(\frac{u(S_{f1})m}{l_1 + l_2} (gl_2 - \dot{x}_2 h) - T_{f1} \right), & \dot{x}_4 &= \frac{1}{I_{f2}} \left(\frac{u(S_{f2})m}{l_1 + l_2} (gl_2 - \dot{x}_2 h) - T_{f2} \right) \\ \dot{x}_5 &= \frac{1}{I_{r3}} \left(\frac{u(S_{r3})m}{l_1 + l_2} (gl_1 + \dot{x}_2 h) - T_{r3} \right), & \dot{x}_6 &= \frac{1}{I_{r4}} \left(\frac{u(S_{r4})m}{l_1 + l_2} (gl_1 + \dot{x}_2 h) - T_{r4} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

3 自适应鲁棒控制控制器

自适应鲁棒控制器如图 2 所示. 从 (1) 式可以看出, 这是一个含有不确定性的非线性时变数学模型. 其中各车轮纵向附着系数 $u(S_{fi})$ 是不确定非线性参量, 它会随着滑移率 s 的变化而不确定性变化, 针对这样的控制对象采用自适应鲁棒控制器的目的是在控制器中引入与不确定性参数对应的可调参数, 通过在线修正该参数来保证整个闭环系统的动态品质. 但是它并不是建立在对被控对象参数的准确估计上. 实际上, 这种控制器的可调参数可以解释为控制器的一个状态变量. 因此, 所设计的自适应鲁棒控制器是一种动态控制器. 对于式 (1) 中的车轮转速微分方程中, 可以用下列式子表示.

$$\dot{x}_i(t) = a_o\theta_1 + a_1\theta_2 + b_0u_i \tag{2}$$

其中以第三个车轮转速方程为例:

$$\dot{x}_i(t)(i = 3, 4, 5, 6), a_0 = \frac{MrgL_2}{I_{f1}(L_1 + L_2)}, a_1 = \frac{-mrh}{I_{f1}(L_1 + L_2)}, b_0 = \frac{1}{I_{f1}}, \theta_1 = u(s_{f1}), \theta_2 = u(s_{f1})\dot{x}_2, u_i = -T_{f1}. \theta_1, \theta_2 \text{ 为不确定量, } a_o, a_1, b_o \text{ 为确定量, } u_i \text{ 为输入量.}$$

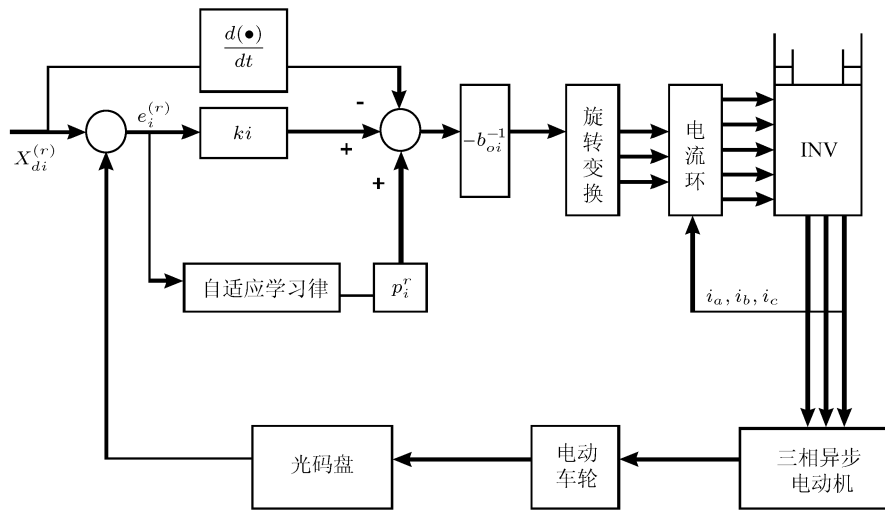


图 2 自适应鲁棒控制器结构
Fig. 2 Adaptive robust ABS controller

则 (2) 式可以进一步写成:

$$\dot{e}_i(t) = -\mathbf{p}_i^T \boldsymbol{\theta}_i - b_{0i}u_i + \dot{x}_{di} \tag{3}$$

其中: $\mathbf{p}_i^T = [a_o, a_1]$, $\boldsymbol{\theta}_i = [\theta_1, \theta_2]^T$, 并定义: $e_i = x_{di} - x_i(t)$, $\bar{\boldsymbol{\theta}}_i = \boldsymbol{\theta}_i - \hat{\boldsymbol{\theta}}_i$. $\boldsymbol{\theta}_i, x_{di}$ 为真值, x_i 为实际值, $\hat{\boldsymbol{\theta}}_i$ 为估计值, $e_i, \bar{\boldsymbol{\theta}}$ 为误差. 有定理如下.

定理. 若对于误差系统 (3), 有

$$u_i = -b_{oi}^{-1}(\mathbf{p}_i^T \hat{\boldsymbol{\theta}}_i + k_i e_i(t) - \dot{x}_{di}) \tag{4}$$

自适应学习律

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}_i = -R_i^{-1}e_i(t)\mathbf{p}_i \tag{5}$$

式中: K_i 为反馈增益. R_i 正定对角反馈阵. 则误差系统 (4) 是渐近收敛稳定的, 且有: 当 $t \rightarrow \infty$, $\lim e_i(t) = 0$.

证明是显然的. 若取李亚普诺夫函数 $V = \frac{1}{2}e_i^2(t) + \frac{1}{2}(\theta_i - \hat{\theta}_i)^T R_i(\theta_i - \hat{\theta}_i)$, 式中 $R_i = \text{diag}(\lambda_{1i}, \lambda_{2i})(\lambda_{1i} > 0, \lambda_{2i} > 0, i = 3, 4, 5, 6)$ 为增益阵. 则

$$\dot{V}(t) = e_i(t)\dot{e}_i(t) + (-\dot{\hat{\theta}})^T R_i(\theta_i - \hat{\theta}_i) = k_i e_i^2(t) + [-e_i(t)\mathbf{p}_i^T - \dot{\hat{\theta}}_i^T R_i](\theta_i - \hat{\theta}_i)$$

令取: $\dot{\hat{\theta}}_i = -R_i^{-1}\mathbf{p}_i e_i(t)$ 且 $k_i < 0$, 则有: $\dot{V}(t) < 0$ 显然有: 当 $t \rightarrow \infty$, $\lim e_i(t) = 0$. \square

进而从 (1) 式中第 3 个方程得到其车轮的控制输入量为

$$u_3 = -I_{f1}[\mathbf{p}_3^T \hat{\theta}_3 + k_3 e_3(t) - \dot{x}_{a3}] = -T_{f1}, \quad \dot{\hat{\theta}}_3 = -R_3^{-1}e_3(t)\mathbf{p}_3 \quad (6)$$

式中, $\mathbf{p}_3^T = \left[\frac{mrgL_2}{I_{f1}(L_1 + L_2)}, \frac{-mrh}{I_{f1}(L_1 + L_2)} \right]$, $\hat{\theta}_3 = [\hat{u}(S_{f1}), \hat{u}_x(S_{f1})]^T$, 其中: $u_x(S_{f1}) = u(S_{f1})\dot{x}_2$.

同样对于式 (1) 中的第 4、5 和 6 方程可得到另外三个车轮控制输入量, 都有类似结论. 图 2 表示了自适应鲁棒控制器结构. 由于四个车轮是分别单独控制的, 因此, 图 2 所示的控制器结构共有四套, 分别独立控制四个车轮, $i = 3, 4, 5, 6$.

4 电动车 ABS 试验台

ABS 的功能是控制车辆制动时, 使车轮与地面的附着力保持最大状态, 同时保证车辆在刹车时具有良好的方向稳定性和操纵性. 它表现为车辆在制动时刹车距离相对较短, 车辆能够按照预定轨迹行驶, 不出现跑偏, 侧滑甚至调头等现象. 考虑到实际滑移率 S 的测量十分困难, 本系统控制目标是保证两个车轮在制动过程中的转速始终保持一致. 图 3 为双轮滚筒式试验台简图. 试验台下层台架的两个车轮有各自的制动系统, 上层台架的两个滚筒分别架在下层台架的两个车轮上. 上层台架通过与地面垂直的转轴与下层台架相连. 上层台架可绕约束点旋转. 试验台上的滚筒模拟地面运动, 两个滚筒通过减速器连在同一个惯性飞轮上. 当各滚筒保持同步速度时, 上层台架不会出现跑偏或绕固定轴旋转的现象. 当各滚筒没有保持同步速度时, 就会出现上层台架跑偏甩头现象. 显然试验平台可以模拟电动汽车纵向制动性能. 试验台共有二套制动控制系统, 对两个车轮分别进行制动. 在两个车轮上分别安装有轴向拉压力传感器, 在两个滚筒上分别安装有扭矩传感器、测量滚轮径向水平方向和垂直方向的压力传感器, 通过分别调节两个滚筒与两个车轮之间的正压力, 可以得到模拟不同路面情况下车轮的不同附着系数. 此外在上层台架装有精确的非接触式位移传感器, 测量上层台架的侧向位移. ABS 的执行机构采用电机式制动器, 其制动器是三相异步电机. 电机通过减速器对车轮施加驱动/制动扭矩, 仅使用一个动力装置就可以实现驱动和制动功能.

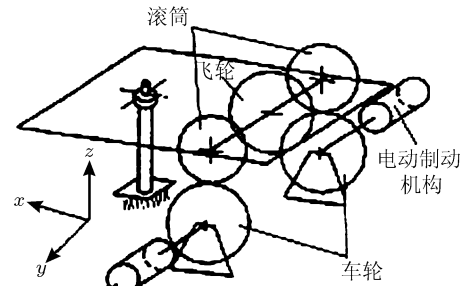


图 3 双轮 ABS 试验台
Fig. 3 Experimental vehicle

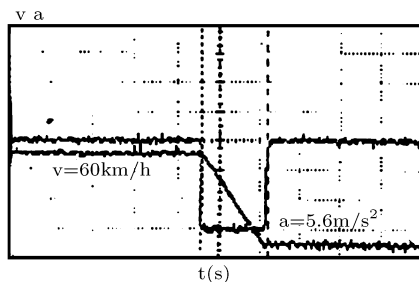
5 试验结果

试验是在电动 ABS 纵向制动性能试验台上进行. 试验台上共有二套 ABS 制动控制系统, 分别对两个车轮实施制动. 每个制动控制系统都是基于自适应鲁棒控制算法设计 (见图 2). 计算机控制系统核心是高速 TMS320F240 DSP 专用芯片. 它完成计算车轮制动过程中自适应鲁棒控制算法的处理, 得到控制信号 $u(t)$, 再转化为 i_q^* 信号, 控制电机制动器适时制动. 电机制动器是 4.7KW 的三相异步电动机. 它完成二个作用. 起动时由它带动车轮旋转转速上升到指定转速, 制动时产生制动力矩对车轮实施制动. 试验时, 通过分别调节两个滚筒与两个车轮之间的正压力, 模拟不同路面情况下车轮的不同附着系数 $u(s)$, 让左车轮模拟干混凝土情况下的附着系数 $u(s)$, 右车轮模拟雪地情况下的附着系数 $u(s)$. 干混凝土情况下的附着系数 $u(s)$ 要比右车轮模拟雪地情况下的附着系数 $u(s)$ 大得多. 实验台的基本参数见表 1. 控制器参数 k_i 绝对值选取一般不过大, 过大虽然增加了鲁棒性, 但使系统增加保守性, 使系统动态指标变坏, 超调量增大. 实际整定时结合常用工程方法扩充临界比例法和试凑法, 得到控制器参数 k_1, k_2 的数值为 $-1.38, -3.16$. $R_1 = 0.3I, R_2 = 0.4I$, I 是 2 阶单位矩阵. 自适应鲁棒控制器的控制输入的计算见式 (4)~(6). 起动时计算机先控制三相异步电机带动两个车轮转速上升到指定车速 60km/h, 而后开始进行 ABS 控制系统试验. 三秒钟内, 车速降至零. 图 4(a) 是左车轮制动时速度和加速度变化实测曲线, (b) 是右车轮制动时速度和加速度变化实测曲线. 可以看出, 两个车轮在制动过程中的速度基本保持一致. 上层台架在制动时的侧向位移 L 实测曲线变化很小, 见 (c) 中曲线①. 用 PID 算法试验时, 当调整好 PID 参数后, 侧向位移 L 变化较小, 也满足性能指标的要求. 但改变滚筒与两个车轮之间的正压力为原来的 50%, 模拟在不同路面下车轮的不同附着系数 $u(s)$ 后, 而控制器 PID 参数又不变更时, 侧向位移变化实测曲线摆动较大, 不满足性能指标的要求, 见 (c) 中曲线②. 可见, 基于自适应鲁棒控制的 ABS 控制系统, 对控制对象具体参数变化的敏感性较低, 具有较好的鲁棒性. 它可以改善系统的响应特性, 提高对各种路面的适应能力.

表 1 ABS 实验台基本参数

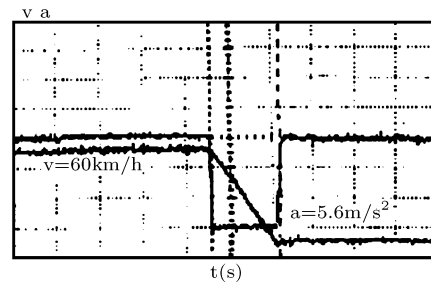
Table 1 Experimental vehicle for ABS

参数	单位	数值
重力加速度 g	M/s^2	9.8
质量 m	kg	1065
质心高度 h	m	0.55
质心到前轮距离 l_f	m	0.95
质心到后轮距离 l_r	m	1.55
车轮半径 r	m	0.3
前轮等效转动惯量 I_f	$Kg \cdot m^2$	1.05
后轮等效转动惯量 I_r	$Kg \cdot m^2$	1.05



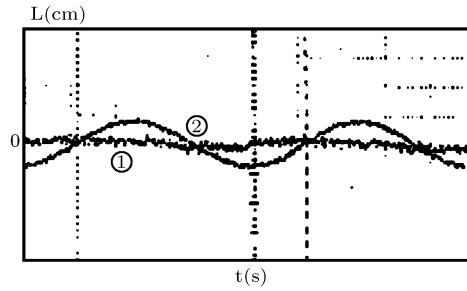
(a) 左车轮

(a) The left wheel



(b) 右车轮

(b) The right wheel



(c) 侧向位移变化实测曲线

(c) Experimental results of lateral traverse

图 4 车轮速度和加速度变化实测曲线

Fig. 4 Experimental results of the left and right wheels

6 结论

本文提出电动车纵向四轮制动模型, 并设计一种基于自适应鲁棒控制控制的 ABS 控制系统. 它可以改善系统的响应特性, 提高制动系统对各种路面的适应能力, 缩短制动距离, 实现电动车方向稳定. 所提出的控制算法在电动 ABS 试验平台上进行了试验, 试验结果证明这种方法是有效的, 对于四轮单独驱动的电动车, 可以确保电动车的纵向制动防抱死的操纵稳定性. 该方法可以直接投入到实际应用中.

References

- 1 Anthony B Will. Antilock brake system modeling and fuzzy control. *International Journal of Vehicle Design*, 2000, **25**(1): 633~638
- 2 Huang Han-Pang, Wang Ching-Kuo. Intelligent control of wheeled vehicles with anti-braking systems. *International Journal of Vehicle Design*, 2001, **26**(3): 218~238
- 3 Horiuchi S, Yuar N. Two Degree of freedom H_∞ controller synthesis for active four wheel steering vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 1996, **25**(3): 275~292
- 4 Li G, Yu D T. Antilock brake fuzzy controller of electric vehicles. *Control Theory & Applications*, 2005, **22**(1): 134~138

李 果 博士后, 教授. 研究领域: 机器人控制、智能控制和鲁棒自适应控制.

(LI Guo Postdoctor. He is currently professor at Beijing University of Science and Technology. His research interests include the robotic control, intelligent control, and robust adaptive control.)

余达太 教授, 博导. 日本九州工业大学研究生院毕业, 研究领域: 控制理论, 工业自动化及智能控制.

(YU Da-Tai Professor at Beijing University of Science and Technology, graduated from Jiu Zhou University of Industry in Japan. His research interests include the robotic control, intelligent control, and robust adaptive control.)