

文章编号: 1001- 2486(2008) 05- 0125- 06

汽车防抱制动系统自适应滑模控制算法的研究和半实物仿真*

刘 波, 张 玘, 罗飞路, 刘国福

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对车辆防抱制动系统(ABS)非线性控制模型, 在分析零阶切换方式滑模变结构控制算法的基础上, 提出了参数自适应的滑模变结构控制算法。该算法将滑模变结构控制、自适应控制与防抱制动系统结合, 削弱了滑模控制的“抖动”问题对制动过程带来的影响。随后设计并构建了 ABS 闭环模拟系统, 对算法进行了纯理论仿真和基于硬件平台的半实物仿真。仿真结果表明, 自适应滑模控制算法较单纯滑模控制算法在减小制动力矩的颤幅和平缓轮速波动方面均有一定优势。

关键词: 非线性系统; ABS; 滑模变结构控制; 自适应控制

中图分类号: TP273⁺ 3 **文献标识码:** A

Research and Half Practical Simulation on Adaptive Sliding Control Algorithms of Automobile Antilock-braking System

LIU Bo, ZHANG Qi, LUO Fei-lu, LIU Guo-fu

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: This paper presents a parameter-adaptation sliding control algorithm based on the analysis of zero-order switching sliding mode control algorithm for the non-linear control model of Antilock-Braking System (ABS). The algorithm, which combines sliding mode control, adaptive control and ABS, weakens the influence of chattering on braking process. The closed loop emulated system of ABS, on which ideal and half practical simulation are completed, is designed and constructed. The results of simulation verify that the adaptive sliding algorithm has the advantage of less the brake torque chattering and smoothening fluctuation of wheel speed signals compared with pure sliding control algorithm.

Key words: non-linear system; ABS; sliding-mode control; adaptive control

滑模控制是一种以经典的控制理论为基础的非线性控制策略, 是根据系统状态偏离滑模面的程度来改变控制器结构, 使系统按照滑模面所规定的规律运行的一种控制方法。滑模控制中模式的设计与对象参数及扰动无关, 从而使得控制具有响应快、对参数变化及扰动不敏感、无需系统在线辨识、物理实现简单等特点。缺点是当状态轨迹到达滑模面后, 难于严格地沿着滑模面向着平衡点滑动, 而是在滑模面两侧来回穿越, 从而产生颤动^[1-2]。而自适应控制在处理参数的不确定性方面比变结构控制要优越, 体现在无须先验知识等, 但其控制算法复杂, 鲁棒性较差^[3]。防抱死制动系统(Antilock-Braking System, ABS)存在诸多不确定性因素, 如轮胎与路面的附着系数、附着系数的变化率以及最佳滑移率参考点的位置等都随路况和车辆运行状态的改变而改变。本文用参考模型自适应控制方案通过在线系统辨识对防抱死制动系统动力学模型的不确定性参数进行估计, 在此基础上提出了模型参考系统滑模变结构的控制算法, 不仅保证了被控系统的运动状态能跟踪理想的运动轨迹, 而且加强了控制器对系统不确定参数的适应性, 从而在根本上提高了控制系统的鲁棒性。

1 制动过程单轮车辆模型^[4]

汽车实际制动过程非常复杂, 为简化研究问题, 只考虑车体纵向运动、车轮转动、空气阻力和车轮滚动阻力, 建立车辆单轮二自由度模型如图 1。

* 收稿日期: 2007- 07- 03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10376043)

作者简介: 刘波(1982-), 男, 博士生。

假设 M 为 $1/4$ 车身质量, R 为车轮滚动半径, J 为车轮的转动惯量, v 为车辆行驶速度, ω 为车轮角速度, F_x 为车轮摩擦力, F_ω 为车轮的滚动阻力, F_v 为空气阻力, F_z 为车轮对地面的法向反力, T_b 为制动力矩。由牛顿第二定律, 列出整车和车轮动力学方程:

$$M\dot{v} = -F_x - F_v \quad (1)$$

$$J\dot{\omega} = RF_x - RF_\omega - T_b \quad (2)$$

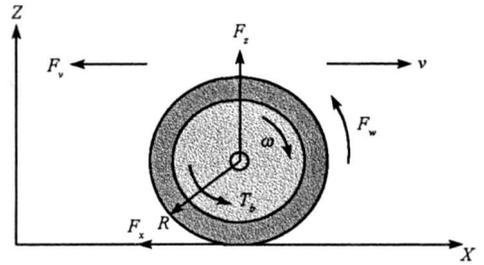


图1 单轮车辆模型
Fig. 1 Quarter-car model

车轮的纵向滑移率定义为: $\lambda = (v - \omega R)/v$, 车轮的摩擦力由下式给出: $F_x = F_z \cdot \mu(\lambda)$, 式中的附着系数 μ 依赖于路面条件和滑移率的大小。定义状态变量: $x_1 = v/R, x_2 = \omega, x_3 = \lambda$ 结合式(1)、(2), 从而有

$$\dot{x}_1 = -f_1(x_1) - b_1 \mu(\lambda) \quad (3)$$

$$\dot{x}_2 = -f_2(x_2) + b_2 \mu(\lambda) - b_3 T_b \quad (4)$$

$$x_3 = \lambda = (x_1 - x_2)/x_1 \quad (5)$$

$$\dot{x}_3 = \dot{\lambda} = f_3(x_1, x_2) - f_4(x_3) \mu(\lambda) + f_5(x_1) T_b \quad (6)$$

式中, $b_1 = F_z/MR, b_2 = F_z R/J, b_3 = 1/J, f_1 = F_v/MR, f_2 = F_\omega R/J, f_3 = [(x_3 - 1) \cdot f_1 + f_2]/x_1, f_4 = [(1 - x_3) b_1 + b_2]/x_1, f_5 = b_3/x_1$ 。

2 ABS 控制算法研究

2.1 零阶切换方式滑模控制算法实现 ABS^[5]

定义零阶滑模变结构控制器切换函数为: $s = \lambda - \lambda_0$, 其中 λ_0 为预设滑移率。在广义滑模条件下按等速趋近率 η ($\eta > 0$) 设计滑模控制器, 其切换函数应满足: $\dot{s} \leq -\eta |s|$, 即 $\dot{s} \leq -\eta \text{sgn}(s)$ 。假设 $f = f_3(x_1, x_2) - f_4(x_3) \mu(\lambda)$, 由于 $\mu(\lambda)$ 未知, 因而 f 也是未知函数, 只能用估值 \hat{f} 来代替, 但 $f - \hat{f}$ 有界, 则取常数 F , 使得 $|f - \hat{f}| \leq F$ 。将式(6)代入 $\dot{s} \leq -\eta \text{sgn}(s)$, 令制动力矩 $T_b = (-\hat{f} - m \cdot \text{sat}(s/\phi))/f_5(x_1)$, 即可满足“广义滑动模态”的存在条件。其中, $m = F + \eta$, 当 $|s| \leq \phi$ 时, $\text{sat}(s/\phi) = s/\phi$, 当 $|s| > \phi$ 时, $\text{sat}(s/\phi) = \text{sgn}(s)$ 。综上可知, $T_b = (-\hat{f} - m \cdot \text{sat}(s/\phi))/f_5(x_1)$ 即为欲求的滑模控制规律。

2.2 ABS 参数自适应滑模变结构控制算法的研究

考虑下面二阶动态非线性系统:

$$\dot{y}_1 = y_2 \quad (7)$$

$$\dot{y}_2 = \xi(y, \tau, t) + u$$

式中, $y = [y_1, y_2]^T$ 表示系统的可测状态变量, $\xi(y, \tau, t)$ 为不确定性非线性函数, u 为系统输入。为方便解决所建立的单轮模型, 现做如下假设:

假设 1 不确定性非线性函数 $\xi(y, \tau, t)$ 满足以下形式:

$$\xi(y, \tau, t) = K(y, t) \cdot \tau = \tau_1 K_1(y, t) + \tau_2 K_2(y, t) + \dots + \tau_m K_m(y, t)$$

其中, τ 为未知的系统参数, $K_i(y, t)$ 为状态 y 的已知非线性函数。

假设 2 非线性函数 $K_i(y, t)$ 连续, 并且 $\partial K_i(y, t)/\partial y_j$ ($i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2$) 存在并有界。

假设 3 未知参数 τ_i 有可知界限, 不妨设为 $\tau_{i, \min}$ 和 $\tau_{i, \max}$, 则有 $\tau_{i, \min} \leq \tau_i \leq \tau_{i, \max}$ 。

参数自适应的目的就是设计控制器, 使得动态非线性系统逼近预期理想轨迹, 因此, 首先建立系统理想轨迹的参考模型如下^[2,6]:

$$\dot{y}_{e1} = y_{e2} \quad (8)$$

$$\dot{y}_{e2} = a_e y_{e1} + b_e y_{e2} + c_e \lambda$$

当系统的参数向量 y_e 已知时, 其中 $y_e = [y_{e1}, y_{e2}]$, 从而可选择控制输入为

$$u = -\tau_1 K_1(y, t) - \tau_2 K_2(y, t) - \dots - \tau_m K_m(y, t) + a_e y_{e1} + b_e y_{e2} + c_e \lambda$$

当参数向量 y_e 未知时, 可定义切换函数为: $s_1 = c_1(y_1 - y_{e1}) + (y_2 - y_{e2})$ 。应用滑模条件可知, 为了保证滑模的存在性, 应保证 $s_1 \cdot \dot{s}_1 < 0$, 即存在函数 $k(y) > 0$, 使得

$$\dot{s}_1 = c_1(y_2 - y_{e2}) + \sum_{i=1}^m \tau_i K_i(y, t) + u - (a_e y_{e1} + b_e y_{e2} + c_e \lambda) = -k(y) \operatorname{sgn}(s_1) \quad (9)$$

综合式(7)、(8)和(9), 可得控制规律如下:

$$u = -c_1(y_2 - y_{e2}) - \sum_{i=1}^m \tau_i K_i(y, t) + a_e y_{e1} + b_e y_{e2} + c_e \lambda - k(y) \operatorname{sgn}(s_1) \quad (10)$$

在此控制规律中, $k(y)$ 只随状态向量 y 变化, 与时间变量 t 无关。由于轮胎与路面附着系数 $\mu(\lambda)$ 函数、附着系数的变化率 $\dot{\mu}(\lambda)$ 函数 ($\mu(\lambda)$ 、 $\dot{\mu}(\lambda)$ 函数属系统参数 τ_i 中的因子) 在制动过程中是时变未知的, 因此要确保滑模的可达性, $k(y)$ 必须取得足够大, 并且满足如下关系式:

$$k(y) \geq \left| \sum_{i=1}^m (\tau_{i\max} - \tau_{i\min}) K_i(y, t) \right| \quad (11)$$

观察式(10)可知, $k(y)$ 越大, 滑模控制器控制规律 u 由 $k(y) \operatorname{sgn}(s_1)$ 项导致的颤振幅度也越大。

为了克服直接应用滑模控制器带来的颤振问题, 至此引入基于系统参数 τ_i 自适应的二阶动态非线性系统 z 参考模型, 如下所示:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= \bar{\xi}(y, \bar{\tau}, t) + \bar{u} \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $z = [z_1, z_2]^T$ 表示系统的可测状态变量, \bar{u} 为 z 参考模型系统输入, $\bar{\xi}(y, \bar{\tau}, t)$ 为不确定性非线性函数, 并且满足:

$$\bar{\xi}(y, \bar{\tau}, t) = K(y, t) \cdot \bar{\tau} = \bar{\tau}_1 K_1(y, t) + \bar{\tau}_2 K_2(y, t) + \dots + \bar{\tau}_m K_m(y, t)$$

考虑式(7)、式(10), 用基于自适应规律的参数变量 $\bar{\tau}_i$ 代替时变未知变量 τ_i , 分别对应于式(12)、式(13), 即将附着系数 $\mu(\lambda)$ 函数、附着系数的变化率 $\dot{\mu}(\lambda)$ 函数导致参数变量 τ_i 的时变性转化为导致对 $k_1(t)$ 的时变性, 从而 $k_1(t)$ 可随路面情况变化, 而不用像式(10)中始终保持于上限值, 这样, 控制器颤振幅度显著减小, 控制规律转化为

$$u = -c_1(y_2 - y_{e2}) - \sum_{i=1}^m \bar{\tau}_i K_i(y, t) + a_e y_{e1} + b_e y_{e2} + c_e \lambda - k_1(t) \operatorname{sgn}(s_1) \quad (13)$$

定义式(12) z 参考模型的逼近函数为: $s_2 = c_2(y_1 - z_1) + (y_2 - z_2)$ 。为了使 s_2 以最快速度靠近 0, 引入自适应函数:

$$\dot{s}_2 + k_2(t) s_2 = \sum_{i=1}^m (\tau_i - \bar{\tau}_i) K_i(y, t)$$

其中 $k_2(t) > \varepsilon > 0$, ε 为正常数。将系统模型和 z 参考模型代入自适应函数, 可得下式:

$$\dot{s}_2 = c_2(y_2 - z_2) + \sum_{i=1}^m (\tau_i - \bar{\tau}_i) K_i(y, t) + (u - \bar{u}) = -k_2(t) s_2 + \sum_{i=1}^m (\tau_i - \bar{\tau}_i) K_i(y, t) \quad (14)$$

综合式(13)、(14), 得到采用参数自适应后系统的控制规律为

$$\bar{u} = c_2(y_2 - z_2) - c_1(y_2 - y_{e2}) - \sum_{i=1}^m \bar{\tau}_i K_i(y, t) + a_e y_{e1} + b_e y_{e2} + c_e \lambda - k_1(t) \operatorname{sgn}(s_1) + k_2(t) s_2 \quad (15)$$

在参数自适应控制系统的滑模稳定性和存在性证明过程中, 可得到 $\bar{\tau}_i$ 的自适应变化规律如下^[3]

$$\dot{\bar{\tau}}_i = \delta_i (s_1 + s_2) K_i(y, t) \quad (16)$$

式中, $\delta_i > 0$, 表示自适应调节率。

3 ABS 闭环模拟系统的设计

为了验证参数自适应滑模控制算法的可行性,设计并实现了 ABS 实时闭环模拟系统,如图 2 所示。其中,PC 机用来将电子控制单元(Electronic Control Unit, ECU)送来的轮速数据、车速数据和其他参数数据进行处理、显示和打印,PC 机和 ECU 之间用 RS232 方式通信,PC 机上采用 LabVIEW 8.0 编程;ECU 将计算结果通过 D/A 变换成模拟电压由电机控制器去控制电机转速,一个 72 齿的 ABS 齿圈固定在电机转轴上,它随电机一起旋转;轮速传感器固定在一个环氧支架上,它将采集到的轮速信号送到 ECU 中去。汽车模型和 ABS 控制算法在 ECU 中实现。ECU 由三部分构成,包括辅助处理电路、轮速信号采集电路和加速度传感器应用电路。

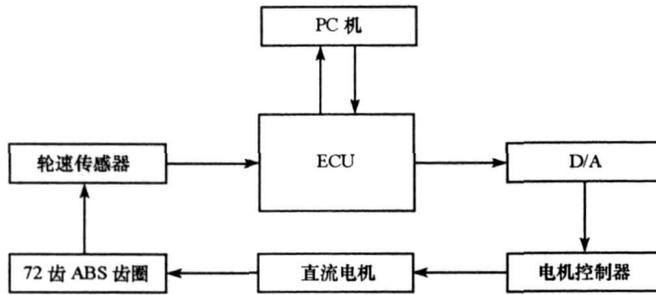


图 2 ABS 实时闭环模拟系统

Fig. 2 Real-time closed loop emulated system of ABS

4 控制算法仿真与实验

算法的验证过程分为纯理论仿真和基于 ABS 闭环模拟系统的半实物仿真两部分。

纯理论仿真采用 Matlab 软件,将参数自适应滑模控制算法应用于车辆整个 ABS 制动过程,仿真结果见图 3。图 3 的(a)中实线为车速曲线,虚线为轮速曲线,(b)为滑移率变化曲线,(c)为制动力矩随时间变化曲线,(d)为制动力矩随时间的变化曲线。

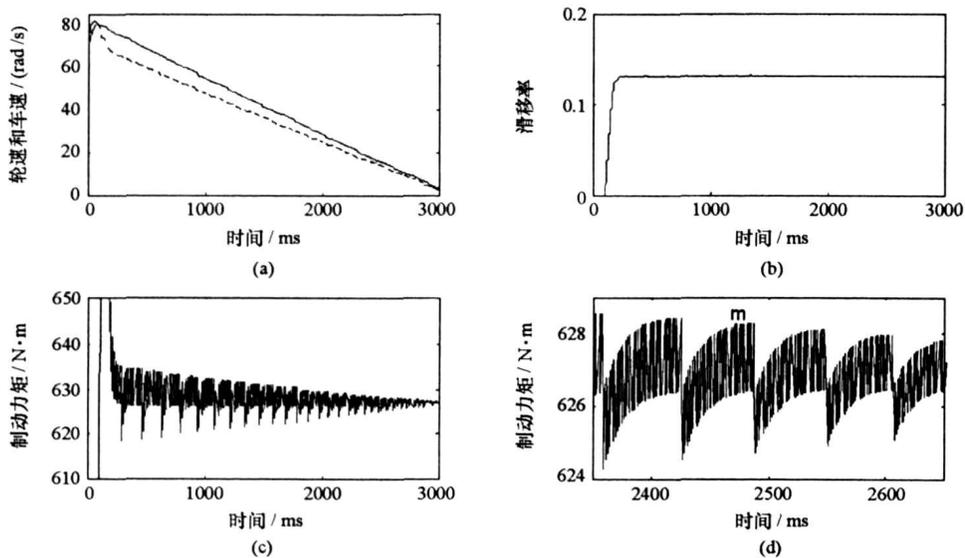


图 3 自适应滑模变结构控制算法湿沥青路面情况下制动全过程纯理论仿真结果

Fig. 3 Simulation result of braking process on watery asphalt roads adopting adaptive sliding algorithm

基于 ABS 闭环模拟系统的半实物仿真软件设计思路如下:PC 机通过 RS232 方式获得 ECU 传来的轮速数据、车速数据后,将数据送至 LabVIEW。LabVIEW 每接收 8 个数据,运行一次 MATLAB 节点。

MATLAB 节点接收轮速、车速数据后, 首先对数据进行异点剔除、均值滤波等处理, 然后运用自适应滑模控制算法求得制动条件下汽车经一个步长后的轮速和车速, 通过相应的 D/A 算法变换成模拟电压由电机控制器去控制电机转速。如果自适应滑模控制算法求得的轮速小于 5rad/s , 则控制电机停止转动, 实验结果如图 4、图 5 所示。

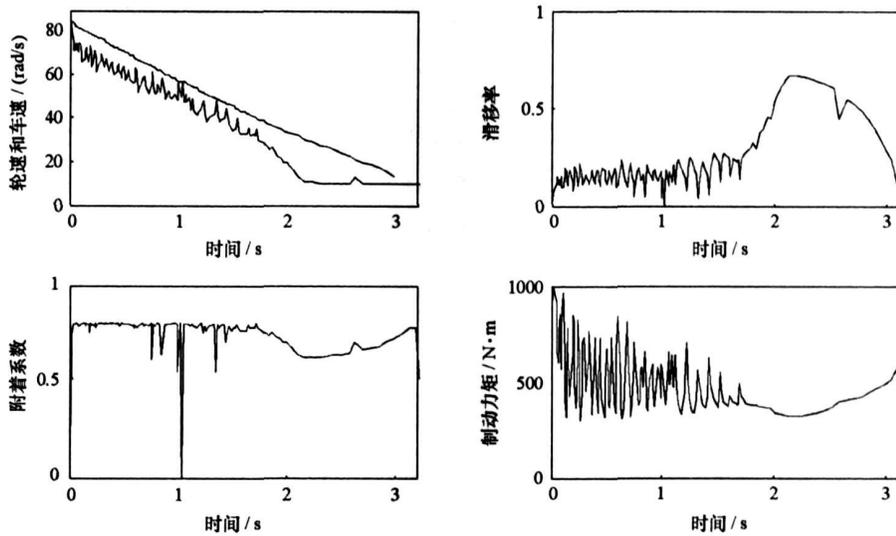


图 4 零阶滑模变结构控制算法湿沥青路面情况下制动全过程半实物仿真结果

Fig. 4 Half practical simulation result of braking process on watery asphalt roads adopting zero-order sliding algorithm

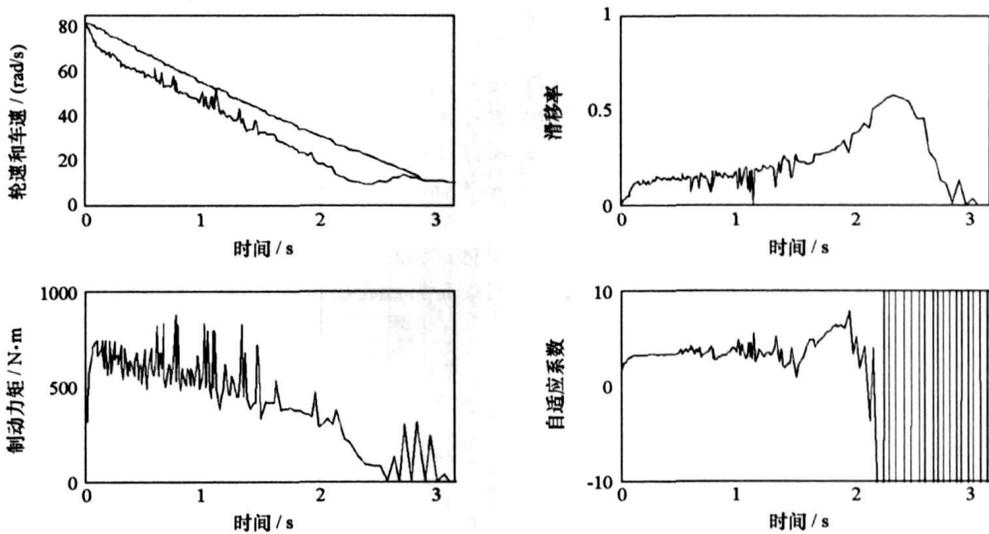


图 5 自适应滑模变结构控制算法湿沥青路面情况下制动全过程半实物仿真结果

Fig. 5 Half practical simulation result of braking process on watery asphalt roads adopting adaptive sliding algorithm

仿真时, 制动系统和控制器各参数取值如下: $M = 250\text{kg}$, $R = 0.31\text{m}$, $F_z = 9800\text{N}$, $J = 1.11\text{kg}\cdot\text{m}^2$, $f_2(x_2) = 0$, $f_1(x_1) = c_w (R x_1 + \text{wind_gust})^2$, $\text{wind_gust} = 0$, $c_w = 0.0058$, $b_1 = 31.62$, $b_2 = 684.24$, $b_3 = 0.91$, $x_1(0) = 21.7\text{m/s}$, $x_2(0) = 70\text{rad/s}$, $\delta_i = 50 (i = 1, 2, 3)$, $\lambda = 0.1308$, $y_{e1} = \lambda - \alpha \cos(\beta t) e^{-\gamma \times t}$, $\alpha = 0.01$, $\beta = 8\pi$, $r = 20$, $a_e = -1031.65$, $b_e = -40$, $c_e = 1031.65$, $\mu(\lambda) = 0.857 \times [1 - \exp(-33.822 \times \lambda)] - 0.347 \times \lambda$, $k_1(t) = [1 + 700e^{-0.3(t-50)}] / [1 + e^{-0.3(t-50)}]$, $k_2(t) = 100$, $c_1 = 50$, $c_2 = 10$ 。纯理论仿真时步长 5ms 。半实物仿真步长为 LabVIEW 中 Matlab 节点每接收 8 个轮速数据的时间, 是时变的, 制动初始时刻步长为 5.3ms 。

分析纯理论仿真图 3 和基于 ABS 闭环模拟系统的半实物仿真图 4、图 5, 有如下结论:

(1) 在纯理论仿真情况下, 自适应滑模控制算法克服了单纯使用滑模控制方法当制动系统稳定于最佳滑移率时制动力矩做高频颤动的缺点。观察图 3(d) 知, 制动过程进行到 2.5s 时, 颤振幅度已缩减至大约 $4.5\text{N}\cdot\text{m}$ 。

(2) 在纯理论仿真情况下, 自适应滑模控制算法能很好地跟踪最佳滑移率, 以最快的时间(大约 3.0s) 实现安全制动。

(3) 观察基于 ABS 闭环模拟系统的半实物仿真图 4, 单纯使用滑模控制方法实现的 ABS 控制器, 滑移率在最佳滑移率上下波动幅度比较大, 制动力矩的波动幅度也比较大, 这导致了制动过程车辆轮速变化比较剧烈, 从而引起车辆行驶中安全性和舒适性降低, 而由半实物仿真图 5 可知, 采用自适应滑模变结构控制器, 轮速变化比较平缓, 滑移率波动范围比较小, 制动力矩变化幅度也不大, 比较理想地实现了 ABS 的制动效果。

5 结论

本文将滑模变结构控制方法和自适应控制方法有机结合, 以防抱死制动系统动力学模型为例, 针对制动过程单轮车辆模型, 提出了一种切实可行的参数自适应的滑模变结构控制算法, 应用 Matlab 进行了纯理论仿真。随之构建了 ABS 闭环模拟系统, 基于 LabVIEW 软件和硬件平台, 验证了自适应滑模算法的有效性和可行性。理论和半实物仿真结果表明, 文中所提出的自适应滑模变结构控制算法使得车辆制动过程制动力矩变化幅度显著减小, 滑移率基本稳定于最佳滑移率, 轮速平稳减小直至为零。综上所述, 自适应滑模变结构控制算法无论从理论上还是基于 ABS 闭环模拟系统硬件平台均能较好地实现防抱死制动。

参考文献:

- [1] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [2] 赵治国, 方宗德, 李杰. 防抱制动系统参数自适应滑模变结构控制器的研究[J]. 机械科学与技术, 2002, 21(1): 6-9.
- [3] Lee T H, Xu J X, Wang M. A Model-based Adaptive Sliding Controller[J]. Int. J. of Systems Science, 1996, 27(1): 129-140.
- [4] Tan H S, Chin Y K. Vehicle Traction Control: Variable-structure Control Approach[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1991, 113: 223-230.
- [5] 刘国福, 张珏, 王跃科, 等. 防抱制动系统基于最佳滑移率的滑模变结构控制方法[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(2): 70-74.
- [6] Xu J X, Hashimoto H. Parameter Identification Methodologies based on Variable Structure Control[J]. Int. J. Control, 1993, 57(5): 1207-1220.