

基于逻辑门限控制的汽车 ABS 仿真分析

王琳¹, 张安霞²

(1. 蚌埠学院 机械与车辆工程学院, 安徽 蚌埠 233030;
2. 郑州日产汽车有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要:为了提高制动稳定性, 结合汽车 ABS 控制原理在 MATLAB/Simulink 环境下采用逻辑门限控制方式建立 ABS 液压控制模型, 以车轮滑动率和车轮角速度作为逻辑门限参数, 设定门限值, 通过液压调节装置实时控制制动力的大小, 防止制动时车轮抱死拖滑。为验证设计效果, 同时搭建未装 ABS 系统的单轮汽车控制模型, 在相同制动条件下进行仿真分析。结果表明: 采用逻辑门限控制方式的汽车模型具有较好的实时性, 制动时 ABS 系统可以使车轮滑动率一直维持在 20% 左右; 与未装 ABS 系统的单轮汽车模型相比, 制动距离缩短了 13.02%。

关键词:逻辑门限; ABS; 滑动率; 制动距离

中图分类号:U463.52

文献标识码:A

文章编号:1671-5322(2019)04-0025-06

防抱死制动系统(anti-lock braking system, ABS)可以根据车轮角速度信号计算车速、车轮滑动率及车轮角减速度, 在汽车制动时可以自动调节车轮制动力的大小, 改善制动效果, 防止车轮抱死拖滑, 提高制动稳定性^[1-2]。目前 ABS 系统常用的控制方式主要有 PID(比例积分微分)控制、模糊控制、最优控制、逻辑门限值控制等方式。其中, PID 控制对被控对象参数变动较敏感, 其控制精度高但适应性差^[3-4]; 模糊控制具有较强的鲁棒性, 但调试整定参数较困难^[4-5]; 最优控制防抱死性能优异, 但控制结构复杂, 工业化推广困难^[2-6]; 逻辑门限控制不涉及具体的控制数学模型, 能使复杂的非线性问题得以简化, 系统实时响应性能佳, 在 ABS 产品中应用较为广泛。

李刚等^[7]考虑汽车制动时轴荷转移, 制定出 ABS 逻辑门限值控制策略, 并在试验台进行验证, 结果表明该研究缩短了制动距离, 提高了汽车制动时的方向稳定性; 周东^[8-9]等在研究 ABS 系统时汽车前后轴采用同一逻辑门限值控制, 改善了制动效果, 但其逻辑门限值控制法需要结合实际工况对过程参数进行选取和调整, 才能达到较好

的控制效果。本文以滑移率为主要控制参数、车轮角减速度为辅助参数, 建立单轮汽车模型对 ABS 系统进行逻辑门限控制策略研究, 并在 MATLAB/Simulink 模块中搭建 ABS 仿真模型进行仿真分析, 以期改善汽车制动效果, 提高行车主动安全性。

1 汽车 ABS 的数学模型

1.1 车辆动力学模型

汽车的实际制动过程非常复杂, 为了便于研究分析, 对其制动过程进行相关假设: ①汽车左右完全对称; ②忽略滚动阻力和空气阻力; ③忽略制动时汽车的侧向运动和横摆运动。在上述假设下, 将整车简化为单轮汽车模型^[10], 如图 1 所示。

根据受力分析, 得到单轮车辆制动模型的微分方程如下:

$$\text{车辆运动方程: } m \cdot u = -\sum F$$

$$\text{车轮运动方程: } I \cdot \omega = F_b \cdot r - T_b$$

$$\text{地面制动力: } F_b = F_z \cdot \varphi_b$$

式中: m 为 1/4 车辆质量, kg; u 为车辆速度, m/s; $\sum F$ 为车辆纵向合力, N; I 为车轮转动惯

收稿日期: 2019-09-25

基金项目: 安徽省高等学校质量工程项目(2017jyxm0540); 蚌埠学院自然科学研究项目(2019ZR01)

作者简介: 王琳(1987—), 女, 河南驻马店人, 讲师, 硕士, 主要研究方向为汽车虚拟样机技术。

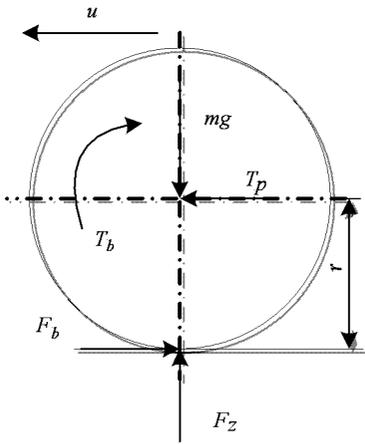


图 1 单轮制动模型

Fig 1 Braking model of the single wheel

量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; ω 车轮角速度, rad/s ; F_b 为地面制动力, N ; r 为车轮半径, m ; T_b 为制动力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; T_p 为车轴推力, N ; φ_b 为制动力系数; F_z 为车轮地面法向反作用力, N 。

1.2 车辆轮胎模型

轮胎模型有很多种,如魔术公式、刷子模型、双线性模型等,实际制动时,轮胎的制动力系数和滑移率并非简单线性的关系。为了使结果更加贴合实际,文中采用双线性模型为研究对象^[11-13],将制动力系数-滑移率关系曲线简化后得到如下表达式:

$$\varphi_b = \frac{\varphi_p}{S_T} \cdot S \quad 0 \leq S_T$$

$$\varphi_b = \frac{\varphi_p - \varphi_s \cdot S_T}{1 - S_T} - \frac{\varphi_p - \varphi_s}{1 - S_T} \cdot S \quad S_T < S \leq 1$$

式中: φ_b 为制动力系数; φ_p 为峰值附着系数; φ_s 为滑动附着系数; S 为车轮滑移率; S_T 为最佳滑移率。

1.3 制动系统模型

车辆制动系统主要包括传动机构和制动器两部分。传动机构主要是液力传动,零部件之间又存在间隙和摩擦,液压油也有压力损失,建模时如忽略电磁阀弹簧的非线性特性和压力传递延迟的影响,将其简化为一个电磁阀和积分环节,则传递函数为:

$$G(s) = \frac{100}{s(s \cdot T + 1)}$$

式中: $G(s)$ 为传递函数; T 为时间常数, s ; s 为自变量。

假设车辆制动器为理想元件,建立制动器数

学模型。该模型主要反映制动力矩和制动系统液压之间的关系,方程如下:

$$T_b = k_f \cdot p$$

式中: T_b 制动力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; k_f 制动系数, $\text{N} \cdot \text{m/kPa}$; p 制动液压力, kPa 。

1.4 车轮滑移率、制动效能数学模型

汽车制动一般分为 3 个阶段:第一个阶段轮胎留在地面上的印痕和轮胎花纹基本一致,车轮近似于纯滚动阶段;第二个阶段轮胎留在地面上的印痕逐渐模糊,在滚动时存在滑动的成分;第三个阶段轮胎在地面上的印痕看不出花纹,车轮完全处于抱死拖滑的状态。为了评价滑动成分的多少,提出了滑移率的概念,其表达式如下^[14-15]:

$$S = \frac{u - r \cdot \omega}{u} \times 100\%$$

式中: S 为车辆滑移率, m/s ; u 为车轮中心速度, m/s ; r 为没有地面制动力时的车轮滚动半径, m ; ω 为车轮的角速度, rad/s 。

遇到紧急情况时,汽车能否迅速降低车速直至停车,常用制动效能来评价。制动效能的量化指标主要有制动减速度和制动距离。

装有 ABS 的车辆制动减速度为

$$a_{b\max} = \varphi_p \cdot g$$

式中: $a_{b\max}$ 为车辆制动减速度, m/s^2 ; φ_p 为峰值附着系数; g 为重力加速度, m/s^2 。

制动距离表达式为

$$s = \frac{1}{3.6} \left(\tau'_2 + \frac{\tau''_2}{2} \right) u_0 + \frac{u_0^2}{25.92 a_{\max}}$$

式中: s 为制动距离, m ; τ'_2 为制动力相对制动踏板滞后的时间, s ; τ''_2 为制动器制动力持续增长的时间, s ; u_0 为初始制动速度, m/s 。

2 汽车 ABS 控制

2.1 汽车 ABS 控制原理

由图 2 汽车制动力曲线可以看出:在 OA 段随着滑移率的增加制动力系数迅速增加;过 A 点后增加缓慢,在 B 点达到峰值,此时对应的滑移率为 $15\% \sim 20\%$;随着滑移率进一步增加,制动力系数开始下降,直至滑移率为 100% ,车轮呈抱死状态,此时侧向附着系数极小,在受到轻微侧向干扰时,车辆将会出现甩尾、侧滑等不稳定现象。

汽车 ABS 系统以制动力曲线为基础进行控制,其工作原理如图 3 所示。制动时将滑移率控制在 $15\% \sim 20\%$ 之间(低于 20% 为制动稳定区

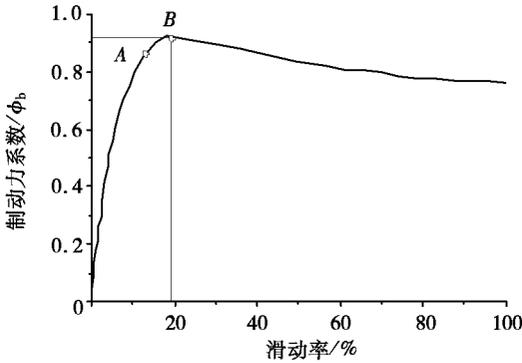


图2 制动力系数—车轮滑移率曲线^[14]

Fig 2 Curve of braking force coefficient-wheel slip rate

域,高于20%为制动非稳定区域),此时地面纵向附着力和侧向附着力均较高,其实际制动过程接近于理想制动过程,可以保证制动时车辆操纵的稳定性。

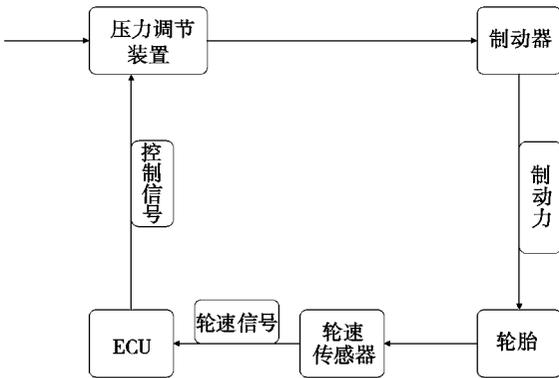


图3 ABS 工作原理图

Fig 3 Working principle diagram of ABS

2.2 汽车 ABS 逻辑门限控制策略

2.2.1 以滑移率参数为主的控制策略

在实际制动时,当滑移率高于设定值 20% 时,ECU 发出指令减小制动力,此时制动压力调节器减小液压制动下的制动压力;当滑移率低于设定值 15% 时,ECU 将发出增大制动力信号的指令,通过制动压力调节器增大制动管路压力;如果滑移率在设定限制以内,压力调节器将处于保压状态。实际制动过程中,压力调节器在 ECU 的调节下以一定频率进行增压、保压、减压的不断切换,使滑移率维持在理想范围内,以便缩短制动距离,提升制动时方向的稳定性。

2.2.2 以车轮角减速度参数为辅的控制策略

ECU 根据车轮的车速传感器信号计算车轮

的实际角减速度,并将其作为控制制动力输出的依据,使其尽可能接近车速折算角减速度。制动时,当车轮角减速度达到门限值时,ECU 输出减小制动力信号,液压制动系统降低制动压力;当车轮转速升高至角减速度门限值时,ECU 输出增加制动力信号,制动液压力增加。

汽车 ABS 的控制策略如图 4 所示。

3 汽车 ABS 系统仿真及结果分析

3.1 汽车 ABS 系统仿真

MATLAB 是美国 MathWorks 公司开发的数学软件,主要用于算法开发、数据可视化、数据分析等领域,主要包括 MATLAB 和 Simulink 两大部分。其中 Simulink 提供了一个动态系统建模、仿真和综合分析的集成环境,无需大量的编程,可以通过简单直观的操作构建出复杂的系统。

本文以某轿车 ABS 系统为研究对象,在 MATLAB/Simulink 模块中搭建仿真模型(图 5)进行仿真,模型具体参数见表 1。仿真时设置最佳滑移率为 20%,仿真时间为 5.0 s,当制动车速降为零时,仿真结束。

表 1 汽车单轮模型参数

Table 1 Parameters of the single wheel model of automobile

参数	参数值
单轮汽车质量/kg	300
初始制动车速/(m·s ⁻¹)	30
车轮滚动半径/m	0.295
车轮的转动惯量/(kg·m ²)	0.7
轴距/m	2.6

为了更好地评价基于逻辑门限控制方式的汽车 ABS 效果的优劣,文中对无 ABS 系统的单轮汽车模型也进行了仿真(在仿真模型中 Ctrl 为 1 时,车辆装有 ABS 系统;Ctrl 为 0 时,车辆未装 ABS 系统),仿真结果如图 6 ~ 图 9 所示。

3.2 汽车 ABS 系统仿真结果分析

图 6、图 7 分别为无、有 ABS 系统的单轮汽车模型角速度变化曲线。从图 6、图 7 可以看出:未装 ABS 系统的汽车制动进行到 0.8 s 时,车轮角速度和车轮折算角速度严重偏离,车轮开始抱死拖滑;装有 ABS 的车辆,车轮角速度和车轮折算角速度基本一致,当制动进行到 4.25 s 时车轮角速度才逐渐降为零。

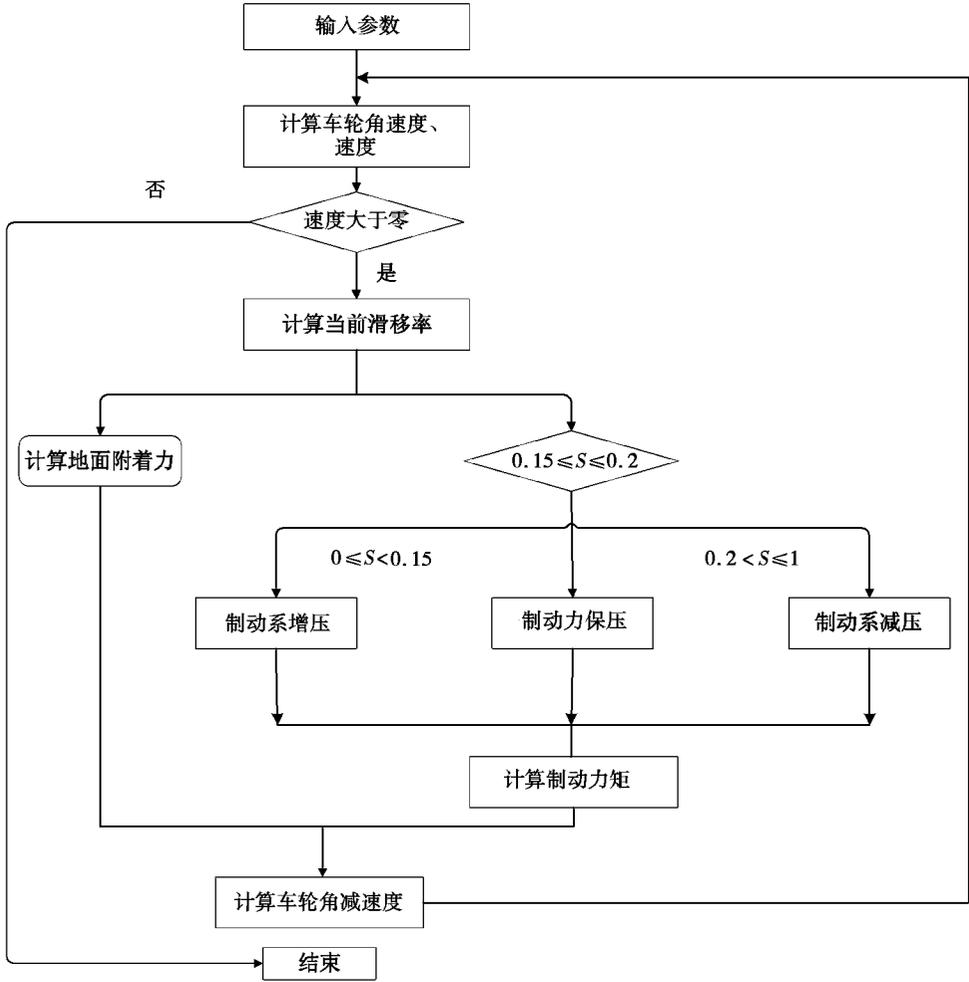


图 4 汽车 ABS 逻辑门限控制策略

Fig 4 Automobile ABS controller strategy with logic threshold

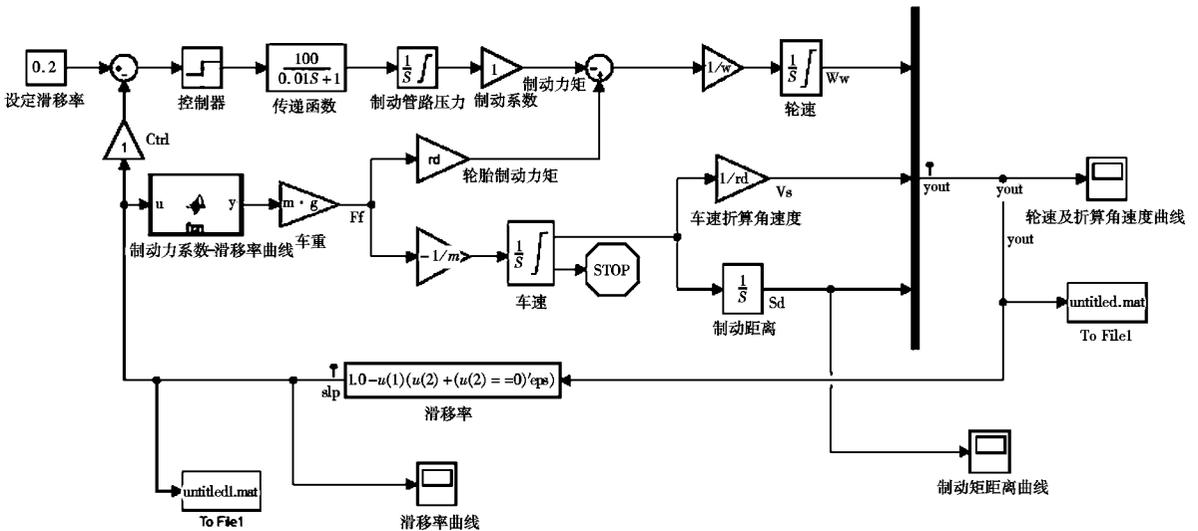


图 5 汽车 ABS 逻辑门限控制模型

Fig 5 Automobile ABS controller model with logic threshold

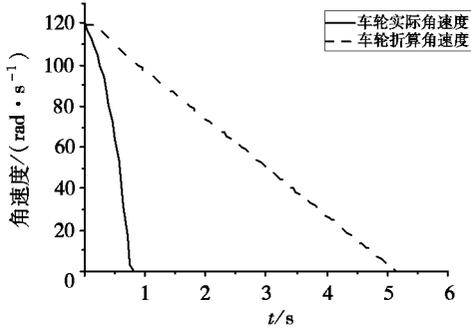


图 6 无 ABS 系统的单轮汽车模型角速度变化曲线
 Fig 6 Angular velocity variation curve of the single wheel vehicle model without ABS system

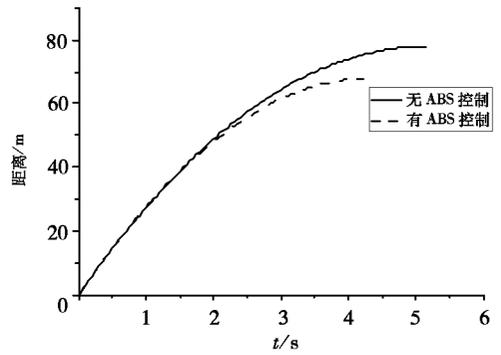


图 9 单轮汽车模型制动距离变化曲线
 Fig 9 Braking distance variation curve of the single wheel automobile model

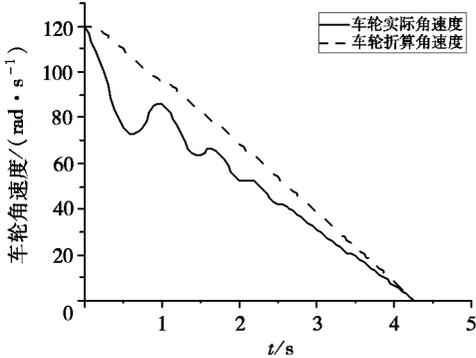


图 7 有 ABS 系统的单轮汽车模型角速度变化曲线
 Fig 7 Angular velocity variation curve of single wheel vehicle model with ABS system

图 9 为汽车无、有 ABS 系统控制的制动距离变化曲线。从图 9 可以看出,加装 ABS 系统的汽车制动距离比未装 ABS 系统的汽车缩短 10.14 m,缩短了 13.02%,制动效果较好。

综合以上分析,在汽车制动过程中,车轮滑动率进入到非稳定区域时,车轮趋于抱死;在 ABS 系统中采用逻辑门限控制方式设置门限值,通过 ECU 的控制、压力调节装置会迅速降低制动管路压力,使车轮滑动率恢复到稳定区域内,保持制动时方向的稳定性;装有 ABS 系统的车辆还能有效缩短制动距离,在紧急制动时,保证行车的主动安全性。

图 8 为汽车无、有 ABS 系统控制的滑动率变化曲线。从图 8 可以看出:随着制动过程的进行,车轮滑动率逐渐增加,但未装 ABS 系统的汽车,制动进行到 0.3 s 后,滑动率迅速升高,直至车轮完全抱死;装有 ABS 系统的汽车,滑动率一直在 20% 上下波动,当制动时间为 4.25 s 时,滑动率才开始快速升高,此时车轮的角速度已经很低,达到 0.12 rad/s 时,制动稳定性较好。

4 结束语

(1) 基于逻辑门限参数综合考虑车轮滑动率和车轮角速度的变化,以逻辑门限控制方式对汽车 ABS 系统进行设计,通过门限值的设置,在制动过程中实时控制制动管路压力的大小以调节制动力的大小。

(2) 在 MATLAB/Simulink 模块中搭建汽车 ABS 液压制动系统模型并进行仿真分析。为了综合评价汽车 ABS 系统效果,对未装 ABS 系统的单轮汽车模型进行对比仿真,验证了采用逻辑门限方式对汽车 ABS 系统设计具有较好的应用效果。

(3) 汽车 ABS 系统可以使车轮滑移率一直维持在 20% 左右,与未装 ABS 系统的单轮汽车模型相比,制动距离缩短了 13.02%。

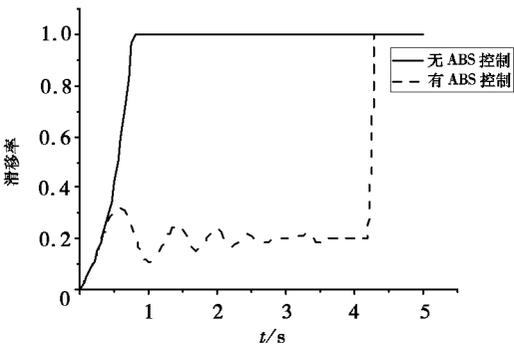


图 8 单轮汽车模型滑动率变化曲线
 Fig 8 Slip rate variation curve of the single wheel automobile model

参考文献:

- [1] 陈奇,姚志刚,Qadeer Ahmed,等. 基于结构分析法的汽车 ABS 故障诊断和识别系统设计与校验[J]. 汽车工程,2018,40(11):1354-1363.
- [2] 尹安东,李聪聪. 电动汽车 ABS 最优滑移率滑模控制研究[J]. 汽车科技,2018(2):8-14.
- [3] 冯瑶. 汽车防抱死制动系统 PID 控制算法仿真研究[D]. 西安:长安大学,2014.
- [4] 段敏,刘武通,李刚,等. 基于 CarSim 汽车 ABS 模糊 PID 控制仿真[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版),2017,37(2):132-136.
- [5] CABRERA J A, ORTIZ A, CASTILLO J J, et al. A fuzzy logic control for antilock braking system integrated in the IMMA tire test bench[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005,54(6):1937-1949.
- [6] 孟杰,芮延年,刘忠,等. 防抱死制动系统的最优控制方法研究[J]. 中国农机化学报,2015,36(3):203-206.
- [7] 李刚,王野,赵德阳. 基于逻辑门限值的汽车 ABS 控制策略与试验研究[J]. 现代制造工程,2017(7):12-16.
- [8] 周东,陈南. 汽车 ABS 逻辑门限控制改进算法的仿真[J]. 可编程控制器与工厂自动化,2009(7):89-93.
- [9] 郑太雄,马付雷. 基于逻辑门限值的汽车 ABS 控制策略[J]. 交通运输工程学报,2010,10(2):69-74.
- [10] 郭建亭,王少勇,吕魁超. 基于 Matlab 的汽车 ABS 仿真研究[J]. 汽车实用技术,2012(11):24-27.
- [11] 吴玲,闻凯,董敏,等. 自适应模糊 PID 控制在汽车 ABS 系统中的应用[J]. 自动化技术与应用,2016,35(1):26-31.
- [12] 张聚. 基于 MATLAB 的控制系统仿真及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2012.
- [13] 王正林,郭阳宽. MATLAB/Simulink 与过程控制系统仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2012.
- [14] 余志生. 汽车理论[M]. 5 版. 北京:机械工业出版社,2009.
- [15] 徐友友,张文春. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社,2018.

Simulation Analysis of Automobile ABS Based on Logic Threshold Control

WANG Lin¹, ZHANG Anxia²

(1. School of Mechanical and Vehicular Engineering, Bengbu College, Bengbu Anhui 233030, China;)
(2. Zhengzhou Nissan Automobile co. LTD., Zhengzhou Henan 450000, China)

Abstract: In order to improve the braking stability, the hydraulic control model of automobile ABS is established by using the logic threshold control method under the MATLAB/Simulink environment in combination with the ABS control principle. Take the wheel slip rate and wheel angular speed as the logic threshold parameters, the threshold value is set, and the size of the braking force is controlled in real time through the hydraulic adjustment device, so as to prevent the wheel from locking and dragging during braking. In order to verify the design effect, a single wheel vehicle control model without ABS system is built and simulated under the same braking conditions. The results show that the vehicle model with logic threshold control has better real-time performance. The ABS system can keep the wheel slip rate at around 20% during braking. Compared with the single wheel vehicle model without ABS system, the braking distance is shortened by 13.02%.

Keywords: logical threshold; ABS; sliding rate; braking distance

(责任编辑:李华云)