

文章编号: 1671-1637(2010)02-0069-06

基于逻辑门限值的汽车 ABS 控制策略

郑太雄, 马付雷

(重庆邮电大学 汽车电子与嵌入式系统研究所, 重庆 400065)

摘要:为了解决参考车速估计的准确性对逻辑门限值法控制的影响,采用改进的峰值连线法估计参考车速,提出以滑移率门限控制为主,车轮加速度门限控制为辅的汽车 ABS 控制策略,并进行了高附着路面实车道路试验。试验结果表明:当车辆速度为 $45 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,参考车速与实际车速曲线基本吻合,最大误差为 6.4% ,平均误差小于 1.6% ,制动时间为 3.2 s ,制动距离为 15 m ,平均减速度为 $3.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,控制效果良好,控制策略可靠。

关键词:汽车工程;防抱死刹车系统;控制策略;逻辑门限值;滑移率;参考车速;改进的峰值连线法
中图分类号:U463.5 **文献标志码:**A

Automotive ABS control strategy based on logic threshold

ZHENG Tai-xiong, MA Fu-lei

(Institute of Automotive Electronic and Embedded System, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In order to solve the impact of the estimated accuracy of automotive reference speed on logic threshold control method, automotive reference speed was estimated by using correctional peak-to-peak connection method, and an automotive ABS control strategy was put forward. In the strategy, automotive slip ratio was main control threshold and automotive acceleration was secondary control threshold. A control test was carried out on the road with high attachment coefficient. Test result shows that at $45 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, the curves of automotive reference speed and real speed match, the maximal error is 6.4% , and the average error is less than 1.6% . Automotive braking time is 3.2 s , the braking distance is 15 m , and the average deceleration is $3.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Obviously, the control effect is good and the control strategy is credible. 2 tabs, 7 figs, 11 refs.

Key words: automotive engineering; anti-lock braking system (ABS); control strategy; logic threshold; slip ratio; automotive reference speed; correctional peak-to-peak connection method

Author resume: ZHENG Tai-xiong (1974-), male, professor, PhD, +86-23-62487859, zhengtx@cqupt.edu.cn.

0 引言

汽车防抱死制动系统(ABS)是一种车辆主动性安全技术,中国 ABS 的研发工作起步较晚,技术水平与先进国家相比还有较大差距,到目前为止,国产

ABS 与国外产品相比,在制动效果及稳定性上面还存在比较大的差距,原因是国内还没有完全掌握 ABS 核心算法,因此,自主研发 ABS 势在必行。

ABS 系统使用的控制方法有逻辑门限值法和基于古典及现代控制理论提出的一些新的控制方

收稿日期: 2010-01-22

基金项目:核高基重大专项(2009ZX01038-002-002-2);重庆市自然科学基金项目(2009BB3416)

作者简介:郑太雄(1974-),男,河北张家口人,重庆邮电大学教授,工学博士,从事汽车电子系统研究。

法,如 PID 控制、滑动模态变结构控制与模糊控制等^[1-2],但是由于理论的不成熟以及算法过于复杂等条件的限制,ABS 产品采用现代控制方法的时机还不成熟,目前,国内外应用广泛的是逻辑门限值控制方法^[3]。这种控制方法的特点是不需要建立具体的数学模型,并且对系统的非线性控制很有效。将这种控制方法用于 ABS 中时,仅需要利用汽车在制动过程中车轮加速度和滑移率门限值控制就可以实现基本的防抱死制动循环,设计一套合理的控制策略是逻辑门限值法能够应用的前提,因此,本文主要针对逻辑门限值的控制策略进行研究。

1 ABS 控制原理

汽车制动过程中,车速和车轮速度之间存在着速度差,也就是车轮与地面之间有滑移现象,滑移的程度用滑移率来表示^[4-5],即

$$S = \frac{100(v - v_{\omega})}{v} \quad (1)$$

式中: S 为滑移率; v 为参考车速; v_{ω} 为车轮速度。

图 1 是附着系数 μ 和滑移率 S 的关系曲线,其中 S_0 为滑移率最佳控制点,具有较大的侧向和纵向附着系数。从图 1 中可以看出侧向附着系数随滑移率增大逐渐变小,而纵向附着系数有增大的趋势。综合考虑侧向和纵向附着系数,在制动时若能使滑移率 S 保持在 S_0 附近^[6],便可同时获得较大的侧向和纵向附着系数,此时既可达到最佳制动效能,又不致丧失转向和抵抗侧向力的作用,即处于最佳制动状态。

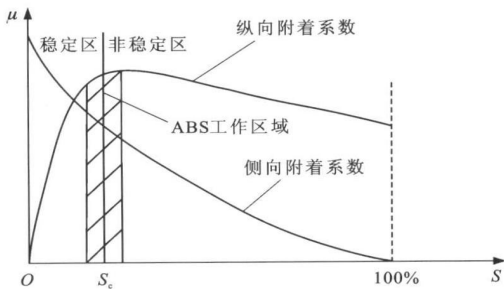


图 1 μ 与 S 的关系曲线

Fig. 1 Relationship curves between μ and S

2 逻辑门限值控制方法

目前,成熟的 ABS 产品大都采用逻辑门限值控制方法,单独以车轮加速度为门限有很大的局限性,在初始和高速紧急制动情况下,有可能使防抱控制逻辑在后继的控制中失效。对于非驱动车轮,也可

能产生过早抱死而使防抱控制逻辑失效^[7]。但如果只以滑移率作为单独的防抱控制门限,则对于不同的路况,很难求得一个最佳的控制效果,因此,需要将车轮加速度和滑移率这 2 个门限结合起来,以识别不同路况,进行自适应的控制。

2.1 以车轮加速度门限为主控的控制策略

车轮加速度是通过车轮速度的一阶差商计算得出的。由于轮齿加工误差、电磁干扰等使得车轮速度信号波动比较大,在没有车轮速度滤波的情况下,计算得出的车轮加速度波动很大,从而触发门限值,造成 ABS 的误动作,而在车轮速度滤波后加速度会变得很平滑。以上 2 种情况都可直接影响控制的效果,因此,本文将考虑采用一种以滑移率为主,加速度为辅的控制策略。

2.2 以滑移率门限为主控的控制策略

滑移率可以直接反映车轮和地面之间的滑移现象,国内外一些文献提到在汽车制动过程中把滑移率控制在 10%~30% 之间时,能达到最佳的制动效果^[7-8],因此,在控制中采用以滑移率为主,车轮加速度为辅的控制策略。

在以滑移率门限为主控的控制策略中,参考车速估计的准确与否将直接影响到整个控制过程,文献^[9]提出一种峰值连线估计参考车速的方法,运用此方法估计参考车速,峰值车轮速度的捕捉是至关重要的。本文提出一种改进的峰值连线法可准确地捕捉制动过程中峰值车轮速度。

3 用改进的峰值连线法求参考车速

3.1 单轮车辆模型

以汽车中某一个轮子为研究对象,采用单轮车辆系统模型,见图 2(g 为重力加速度),车辆和车轮的运动方程以及纵向摩擦力方程分别为

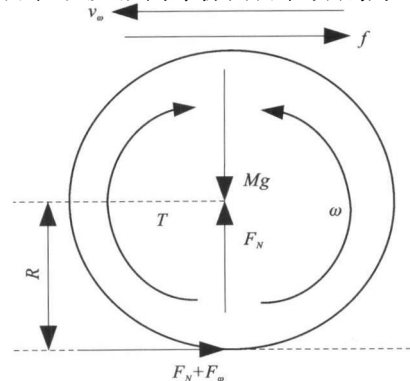


图 2 单轮模型

Fig. 2 Model of single wheel

$$Mv'_{\omega} = -F_N - F_{\omega} - f \quad (2)$$

$$J\omega' = R(F_N + F_{\omega}) - T \quad (3)$$

$$F_N = \mu N \quad (4)$$

式中: M 为车辆质量; F_N 为车轮摩擦力; F_{ω} 为车轮滚动阻力; f 为空气阻力; T 为制动力矩; J 为车轮转动惯量; R 为车轮半径; ω 为车轮角速度; N 为车轮与地面法向反力。

图1中画出了附着系数与滑移率的函数的关系曲线,下面给出具体的函数关系式^[7]为

$$\mu = \frac{\mu_h}{S_c} S \quad S \leq S_c \quad (5)$$

$$\mu = \frac{\mu_h - \mu_h S_c}{1 - S_c} - \frac{\mu_h - \mu_b}{1 - S_c} S \quad S > S_c \quad (6)$$

式中: μ_b 为滑移率为 100% 时的附着系数; μ_h 为峰值附着系数。

式(2)中忽略车轮滚动阻力和空气阻力,并代入式(4)可得

$$Mv'_{\omega} = -\mu N$$

当 $S \leq S_c$ 时,即在稳定区域时,把式(5)代入 Mv'_{ω} 中变形,得

$$v'_{\omega} = -\frac{N\mu_h S}{MS_c}$$

N 、 M 、 μ_h 可设为定值时,在稳定区域,车身减速度与滑移率 S 成线性关系,滑移率 S 越小, v'_{ω} 越小,车速下降得越平缓;当 v'_{ω} 趋近于 0 的时候,车辆做近似的匀速直线运动,因此,此时车轮速度值为局部最大车轮速度,滑移率最小。假设相邻 2 个峰值出现的时间足够短时,滑移率一直保持最小值不变,那么 v'_{ω} 也一直保持一个固定值,车辆做匀减速直线运动。此时的峰值连线近似于一条直线,又因为此时的滑移率小,车速与车轮速度相差小,所以车速曲线与峰值连线的斜率相当,因此,可以认为峰值连线能够很好地反映车速的变化趋势,可以利用峰值连线法估算车体减速度,进而计算车速。

3.2 峰值连线法求参考车速原理

在用逻辑门限控制方法进行了大量的台架和道路试验后,得到了车轮速度和车速大致的变化曲线,图3是在高附着系数路面仿真台架上的制动曲线,当电磁阀状态信号标志位为 10 表示气动系统增压,标志位为 20 表示保压,标志位为 30 表示减压。

由图3知车轮速度峰值点处于阶梯增压状态(交替的增压和保压)中,此时刚刚经过减压和保压状态,由于气体滞后的影响,车轮速度会在阶梯增压状态中回升到局部最高,也就是说此时的峰值车轮

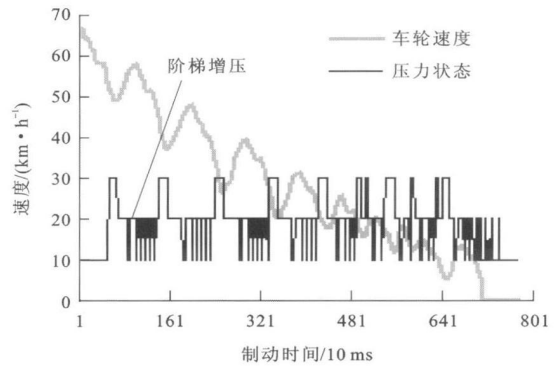


图3 制动曲线

Fig.3 Braking curves

速度最接近真实的车速。参考车速为

$$v_d = v_q - a_n \Delta t \quad (7)$$

$$a_n = (P_n - P_{n+1}) / \Delta T_{n+1} \quad (8)$$

式中: a_n 为车体加速度 ($n=0, 1, 2, \dots$); v_d 为当前参考车速; v_q 为前一时刻参考车速; P_n 为前一时刻峰值车轮速度; P_{n+1} 为当前峰值车轮速度; Δt 为当前时刻和前一时刻的时间差; ΔT_{n+1} 为当前峰值和前一时刻峰值的时间差。当 $n=0$ 时

$$v_d = v_q - \omega \Delta t$$

式中: ω 为常数,路面附着系数不同时 ω 应该有所区别。当 $n \geq 1$ 时,按照式(7)、(8)在出现峰值后修正参考车速,使之接近于真实车速。

3.3 改进峰值连线法的峰值捕捉

由于车轮速度信号传感回路是弱电系统,容易受外界强电磁的干扰,而且汽车运行过程中由于路面不平度的影响,车轮速度监测装置(齿圈和车轮速度传感器)也容易发生振动,这些都可能产生干扰信号^[10],即使经过滤波后的车轮速度,也可能出现一些伪峰,因此,剔除上述情况产生的伪峰是峰值捕捉准确与否的关键,在对试验数据以及整个控制过程进行分析后得到以下结论。

(1)在图3中保压阶段是在减压阶段之后,目的是让车轮速度缓慢回升,而接下来的阶梯增压阶段是一个建立压力的过程,此时的车轮速度开始下降。保压到阶梯增压是一个车轮加速度由正变负的过程,因此,峰值的出现也应该就在此过程中。

(2)峰值出现时车轮速度回升到局部最高,此时车轮速度最接近于真实车速,因此,此刻的滑移率应小于某一数值,在对出现峰值时的滑移率进行统计分析后,得出结论,滑移率 $S < 20\%$ 时才会出现真正的峰值。

这样就可以避免捕捉到出现在其他控制阶段的

伪峰,缩小了捕捉到伪峰的概率。用改进的峰值连线法捕捉峰值的流程见图4。图中 A 为当前车轮加速度, a 为前一时刻车轮加速度。

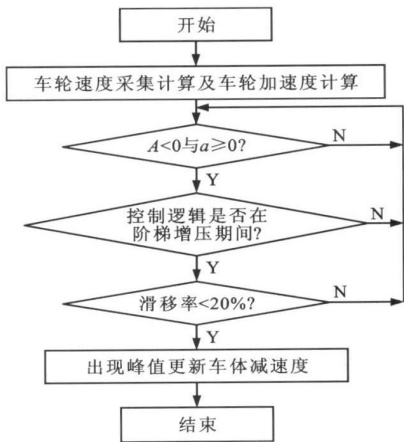


图4 峰值捕捉流程

Fig.4 Flow of capture peak

4 控制逻辑及流程

根据制动压力、车轮速度和地面附着力的关系,可将每个ABS控制循环大致分为增压、减压和保压3种状态。鉴于首次循环的特殊性,把增压状态又分为首次增压和阶梯增压。门限值参数的设置是在实车路试过程中总结得来的经验值。控制逻辑流程见图5, S_1 、 S_2 、 S_3 和 A_1 、 A_2 、 A_3 分别表示不同控制

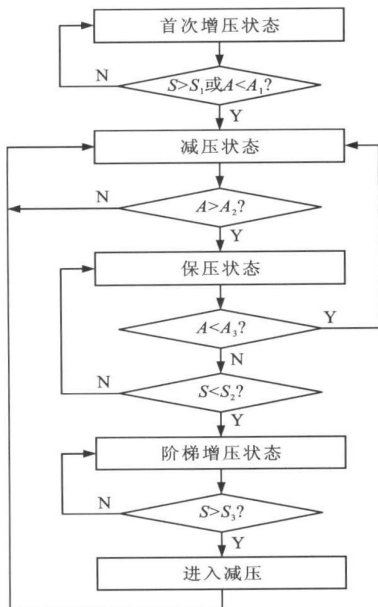


图5 控制逻辑流程

Fig.5 Flow of control logic

阶段滑移率和车轮加速度的门限值,见表1。

表1 控制参数含义

门限参数	含义
S_1	进入首次减压的滑移率门限
S_2	保压进入阶梯增压的滑移率门限
S_3	阶梯增压进入减压的滑移率门限
A_1	进入首次减压的车轮加速度门限
A_2	减压进入保压的车轮加速度门限
A_3	保压进入减压的车轮加速度门限

在ABS控制中,首次循环应让防抱死的功能充分地发挥,要求有较大的速度差,但又不能有过强的制动,太强及太弱的防抱死循环都给后续的防抱死循环带来不利,所以首次增压状态要有较大的滑移率门限值和较小的加速度门限值。一般首次进入减压的滑移率门限 S_1 要比后面循环的 S_3 大5%~10%,另外首次2个前轮制动效果的好坏还直接影响制动方向的稳定性,因此,控制中应保证2个前轮制动的同步性。

减压状态使车轮速度回升,车轮加速度门限值 A_2 一般在 $1\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 之间。如果设置的门限值太小,车轮速度还没有充分恢复就进入保压状态,这样会产生抱死趋势。如果设置的门限太大,车轮速度可能无法达到这一门限值,在这种情况下就有可能出现失控,导致车轮速度一直处以减压恢复状态,制动时间和距离就会变长。

保压状态一方面可以使车轮速度不过度恢复,保持一定的制动状态,直到滑移率门限小于 S_2 进入阶梯增压状态;另一方面,在保压状态中如果车轮加速度小于 A_3 ,说明此时车轮速度回升不够,继续保压或增压可能会使车轮抱死,应再次进入减压状态,使车轮速度适当地回升。门限值 A_3 在减压状态之后,与 A_2 的值相比不能太大,原则上不应超过 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,太大会造成减压过多导致制动距离变长。

阶梯增压状态与前面首次增压状态相比,增压速率要根据制动的不同阶段分开设定,制动初期处于压力建立阶段,此时增压速率应该比制动后期的速率快些,这样可以在制动的初始阶段建立足够的压力,能够保证后期制动不会出现松动。另外每次循环中的首次和常规阶梯增压的速率也应该有所区别,在不抱死的情况下,使车轮速度充分下降。

在实际控制过程中,由于驱动轮比非驱动轮的转动惯量大,在相同门限的情况下,非驱动轮对制动压力反映敏感,所以门限值应该小些。

5 应用实例分析

针对红岩CQ1160T6F15G2型载货汽车,采用英飞凌XC164CS为主控芯片,开发了ECU,硬件框图见图6,主要包括系统主控芯片及外围电路、电源电路和系统接口电路。在实车试验时加装淄博赛格电子有限公司研发的非接触多功能速度仪CTM-8A测量车速(以下称为实际车速),运用以滑移率门限控制为

主,以车轮加速度门限控制为辅的控制策略,参考车速的估计采用改进的峰值连线法,并对该ECU进行了高附着道路试验。试验条件:干燥的水泥路面,具有较好的附着系数。试验主要设备有:重庆邮电大学自主开发的ABS ECU、非接触多功能速度仪、装有上位机数据采集软件的笔记本、USB-CAN通信卡、磁电式车轮速度传感器与电磁阀等。试验中的控制参数是道路试验中所得的经验值,见表2(后轮为驱动轮)。

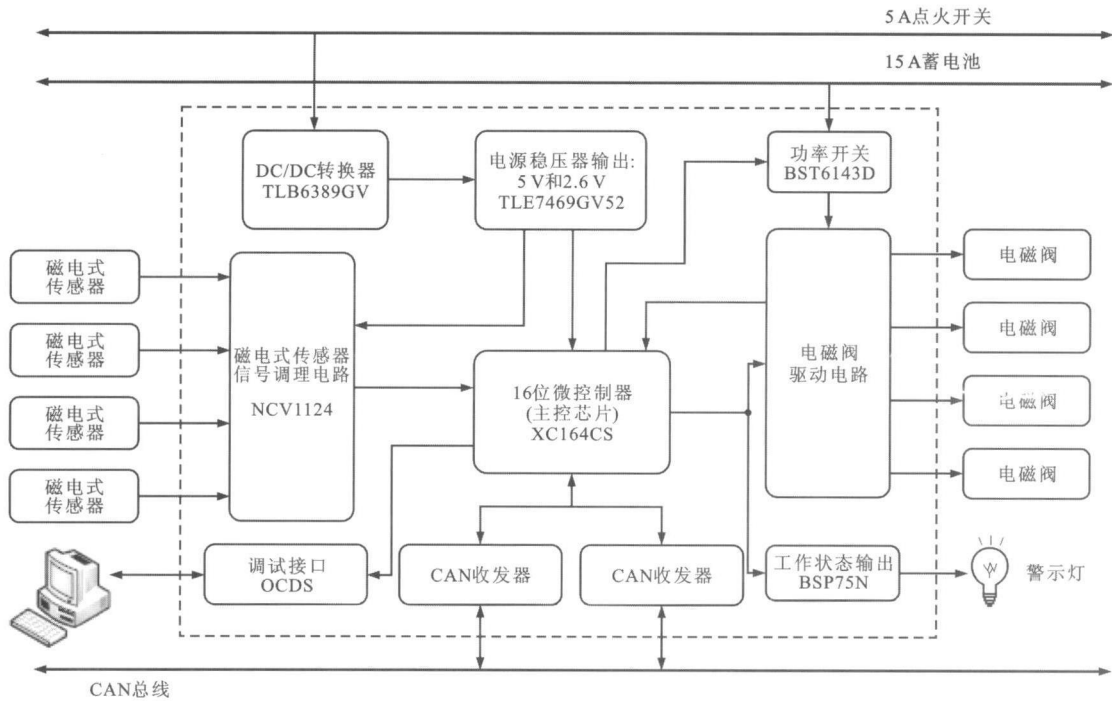


图6 ABS ECU 硬件框图

Fig.6 ECU structure of ABS

表2 控制参数

Tab.2 Control parameters

	滑移率门限值/%		车轮加速度门限值/($m \cdot s^{-2}$)		
	前轮	后轮		前轮	后轮
S_1	16	18	A_1	-12.0	-14.0
S_2	13	14	A_2	1.5	2.2
S_3	11	13	A_3	1.8	2.5

图7是车辆以 $45 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的初速度在高附着路面制动时车轮速度、参考车速和实际车速的变化曲线。由图7可知,采用改进的峰值连线法估计参考车速,当车轮速度出现峰值时,通过峰值连线的斜率对车体加速度进行更新,从而不断地修正参考车速,与速度仪测得的实际车速曲线基本保持吻合,最大误差为6.4%,平均误差小于1.6%,从而验证了改进峰值连线法的实用性和准确性。另外,在车辆制动过程中车轮速度变化趋势较好,后轮为驱动轮

控制循环次数比前轮稍多,前后轮均没有发生抱死现象,车辆整体也未出现跑偏和甩尾现象。在 $45 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,制动时间为3.2 s(数据采集周期为10 ms),制动距离为15 m,平均减速度为 $3.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,制动效果总体较为理想。

另外,同速度下成熟的国外产品WABCO的ECU测试制动距离为12 m,制动时间为2.8 s,在对试验数据进行分析后,未来的试验方向应向以下2个方面进行改进。

(1)前轮制动的同步性需要提高,从试验结果来看制动的稳定性和舒适性与前轮制动的不同步有很大的关系。

(2)低速控制需要改善,从整个制动过程以及试验数据来看,前期速度较高时制动效果较好,后期低速时减压过多,造成制动稍慢,使制动时间和制动距离过长。

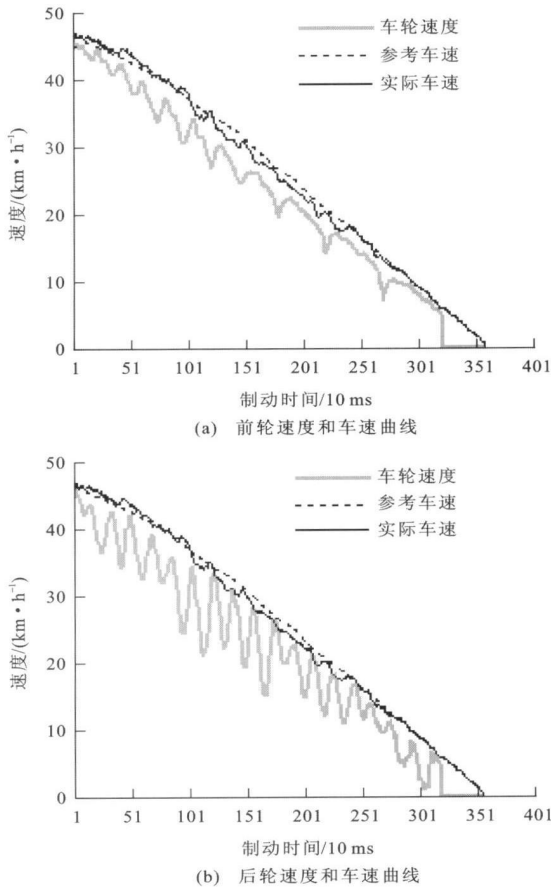


图 7 车轮速度和车速曲线

Fig.7 Curves of vehicle speed and wheel speeds

6 结 语

逻辑门限值控制方法是比较成熟的控制方式,本文介绍的以滑移率门限控制为主,以加速度门限控制为辅的控制策略,在高附着道路试验中取得很好的控制效果,为下一步低附着、中附着、对开、对接路面的道路试验打下了基础。优化控制策略^[11],改善系统稳定性以及提高路面识别的准确性是 ABS 系统达到最佳控制效果的前提,今后需要进一步研究。

参 考 文 献 :

References :

[1] LAYNE J R, PASSINO K M, YURKOVICH S. Fuzzy learning control for antislid braking system[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1993, 1(2): 122-129.

- [2] LIN C M, HSU C F. Self-learning fuzzy sliding-mode control for antilock braking system[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2003, 11(2): 273-278.
- [3] 孙晓丹. 基于XC164CS的汽车防抱死控制器软件设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2007.
- SUN Xiao-dan. Software design of anti-lock controller based on XC164CS[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [4] JIANG F J, GAO Z Q. An application of nonlinear PID control to a class of truck ABS problems[C]//IEEE. Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando: IEEE, 2001: 516-521.
- [5] CABRERA J A, ORTIZ A, CASTILLO J J, et al. A fuzzy logic control for antilock braking system integrated in the IM-Ma tire test bench[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(6): 1937-1949.
- [6] 陆文昌. 汽车防抱死制动系统性能的研究[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(11): 65-68.
- LU Wen-chang. Study on braking performance antilock braking system [J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(11): 65-68. (in Chinese)
- [7] 陈华述. ABS ECU 控制逻辑的研究及测试系统的开发[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- CHEN Hua-shu. Performance study of ECU for ABS and its test equipment development [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004. (in Chinese)
- [8] LU Hong-qing, JIA Ying-min, DU Jun-ping, et al. ABS composite control based on optimal slip ratio [C]//ACC. Proceedings of the 2007 American Control Conference. New York: ACC, 2007: 5748-5752.
- [9] 李 锐, 郑太雄, 李银国, 等. 汽车防抱死制动系统分级智能控制[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 135-141.
- LI Rui, ZHENG Tai-xiong, LI Ying-guo, et al. Hierarchical intelligent control of automobile anti-lock braking system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 135-141. (in Chinese)
- [10] 厉 朴, 宋 键, 于良耀. 汽车防抱制动系统轮速信号异点剔除预处理算法[J]. 公路交通科技, 2001, 18(4): 120-122.
- LI Pu, SONG Jian, YU Liang-yao. A preconditioning algorithm of singular point rejecting for wheel speed signal processing in anti-lock brake system[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2001, 18(4): 120-122. (in Chinese)
- [11] 孙仁云, 郭 辛, 龙行现. 基于门限值控制的汽车 ABS 控制器的研制[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(4): 408-413.
- SUN Ren-yun, GUO Xin, LONG Xing-xian. Development of automobile ABS controller based on threshold control method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 38(4): 408-413. (in Chinese)