

DOI: 10.3901/JME.2010.22.090

# ABS 逻辑门限值自调整控制方法研究与试验验证\*

王伟达<sup>1</sup> 丁能根<sup>2</sup> 张为<sup>2</sup> 余贵珍<sup>2</sup> 徐向阳<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学机械与车辆学院 北京 100081;

2. 北京航空航天大学交通科学与工程学院 北京 100191)

**摘要:** 自主研发防抱死制动系统(Anti-lock braking system, ABS)是掌握车辆底盘动力学主动控制技术的基础。依照广泛的道路试验数据和目前产业化 ABS 普遍采用的逻辑门限值控制方法, 结合试验数据分析各门限值对防抱死控制效果的影响, 从而确立门限值标定与调整的基本原则。在此基础上, 借鉴自适应控制中的自校正调节器思想, 提出一种逻辑门限值自调整算法, 依据有限的轮速传感器信号在线辨识当前路面的最佳制动滑移率与计算参考车速, 根据车轮滑移率与最佳滑移率的偏差自动调整各主要门限值, 以达到最佳的制动控制。通过在各种工况下的道路试验标定了控制参数, 验证了该方法的控制效果。试验结果表明, 提出的门限值自调整方法克服了不同路面附着系数、车速、载荷诸因素对防抱死控制的影响, 实现了在各典型工况都较优的 ABS 控制。开发的 ABS 系统具有较好的控制效果, 满足了开发要求, 为 ABS 产业化提供了前提。

**关键词:** 逻辑门限值 自校正调节器 试验验证

**中图分类号:** U461.1

## Research and Verification of the Logic Threshold Self-adjusting Control Method for ABS

WANG Weida<sup>1</sup> DING Nenggen<sup>2</sup> ZHANG Wei<sup>2</sup> YU Guizhen<sup>2</sup> XU Xiangyang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;

2. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191)

**Abstract:** Independently developing anti-lock braking system (ABS) is the basis of mastering the active dynamic control technology of vehicle chassis. According to the experimental data and the logic threshold control method widely used in the industrial ABS, the impact on ABS control of every logic threshold is analyzed and the basic rules of calibrating the logic thresholds is established. By borrowing the idea from the self-tuning regulator in adaptive control, a logic threshold self-adjusting algorithm is presented. The algorithm identifies the optimal brake slip ratio of the road and calculates the reference speed on-line. The main logic thresholds are adjusted automatically according to the error between the wheel slip ratio and the optimal slip ratio in order to improve the control performance. The control parameters are calibrated and the control performance of the self-adjusting algorithm is verified by road tests under various conditions. The test results indicate that the presented logic threshold self-adjusting algorithm overcomes the influence of different factors, such as road adhesion coefficient, speed and load, on the ABS, thereby the optimal ABS control under every condition is realized. The developed ABS has good control effect and meets the development requirement. It provides a foundation for ABS industrialization.

**Key words:** Logic thresholds Self-tuning regulator Road tests

## 0 前言

汽车制动防抱死系统(Anti-lock braking system, ABS)能显著改善车辆制动过程中的制动性、稳定性和可操作性, 减少紧急制动时的甩尾和不能转向导

致的交通事故, 目前得到了广泛的应用。国外经过几十年的研究与产业化生产, ABS 技术已经相当成熟, 并衍生出一系列更高级的动力学控制系统。在我国汽车安全已引起了国家的高度重视, 自主研发 ABS 是掌握车辆底盘动力学主动控制技术的基础, 并且具有广泛的市场前景, 所以国内也开展了大量的研究与开发工作。清华大学、北京理工大学、吉林大学、江苏大学和北京航空航天大学等在技术追

\* 国家高技术研究发展计划(863 计划, 2009AA11Z216)和国家自然科学基金(50908008)资助项目。20091210 收到初稿, 20100628 收到修改稿

踪、系统建模、策略研究及实车试验方面取得了丰富的成果<sup>[1-3]</sup>;一些自主品牌的 ABS 生产厂家如科密、博华、正昌等,在产业化方面处于国内领先地位。控制方法集中在逻辑门限值方法,配套车型主要为采用气压制动系的商用车。

纵览国内外 ABS 控制方法研究的现状<sup>[4-6]</sup>,虽然关于基于滑移率的控制方法(如最优控制、滑模变结构控制、鲁棒控制和模糊控制等)论述较多,但是在实际应用这些控制算法时常常难以对路面条件和制动工况做出准确的识别,依靠模型对某些参数进行计算导致计算量过大,而不依赖试验知识则难以克服非线性动力学特性对汽车控制效果的影响。因此,这些控制方法离实用尚有一定的距离,逻辑门限值控制方法依然是产业化 ABS 的主流,开展对应用于 ABS 的 Bosch 逻辑深入细致的分析研究具有重要的工程价值。同时,根据道路试验情况提出对 Bosch 逻辑的改进,对于提升 ABS 控制水平、推动国内的产业化开发具有重要意义。

本文基于 Bosch 逻辑门限值控制方法,结合实车试验数据分析了各主要门限值取值范围确定和对 ABS 控制效果的影响。研究了 ABS 的关键算法——最佳制动滑移率自动识别与参考车速计算方法,提出了一种逻辑门限值自调整的策略,来改善门限值控制效果。开发了发动机控制器(Engine control unit, ECU),进行了控制参数实车标定,完成了 ABS 系统的开发与试验。

### 1 各门限值影响分析

Bosch 逻辑门限值控制方法<sup>[7]</sup>采用的门限值主要有车轮角减速度门限  $\dot{\omega}_1$ 、车轮角加速度门限  $\dot{\omega}_2$ 、车轮角加速度第二门限  $\dot{\omega}_k$  以及参考滑移率第一门限  $S_1$  和第二门限  $S_2$ 。压力的调节方式主要为增压、减压、保压、阶梯增压和阶梯减压,采用何种调节方式则由门限值决定。ABS 匹配试验主要调整的参数除了上述 5 个门限值外,还包括阶梯增压控制的增压时间常数和保压时间常数、阶梯减压控制的减压时间常数和保压时间常数等。

ABS 控制器的标定过程也主要针对这些门限值进行。辨别各门限值对控制效果的影响规律及影响程度,对标定试验的效率及人力、物力、时间成本具有决定性意义。所以,本文首先结合门限值理论与自主开发的 ABS 在一汽某 SUV 试验样车上的试验结果,分析各门限值对控制过程的影响。

一个典型 ABS 逻辑门限值控制循环的基本过

程如下<sup>[7]</sup>:车辆紧急制动时,轮缸制动压力迅速升高,车轮经过一定延迟时间后,轮速开始迅速下降,角加速度为负,且绝对值越来越大。当车轮角加速度低于  $\dot{\omega}_1$  门限时,ABS 开始介入控制。为使车辆避免在稳定区域内进入减压阶段,这时还要比较滑移率。如果滑移率低于  $S_1$ ,说明滑移率还偏小,进入保压,以使车轮充分制动;否则说明车轮已进入峰值附着系数附近的不稳定区域,开始减压。由于减压,车轮角加速度开始回升,高于  $\dot{\omega}_1$  门限时,进入保压。由于惯性及当前制动压力水平偏低,轮速会继续回升,直至角加速度超过  $\dot{\omega}_2$  门限。在给定的保压时间内,如果角加速度不能超过  $\dot{\omega}_2$ ,则属于低附着路面情况;如果超过  $\dot{\omega}_2$ ,则继续保压,此时会出现两种情况:一是角加速度超过  $\dot{\omega}_k$ ,则需要进行一次增压,直至角加速度低于  $\dot{\omega}_2$ ;二是角加速度再次低于  $\dot{\omega}_2$ ,这时车轮处于峰值附着系数的稳定区域,并稍有制动不足。两种情况最后都可低于  $\dot{\omega}_2$ ,且附着系数比较大,为使在这一区域内的时间尽量延长,因此采用阶梯增压方式,直到角加速度门限再次低于  $\dot{\omega}_1$ 。在低附着路面,角加速度无法恢复到  $\dot{\omega}_2$  时,为使系统稳定,采取阶梯减压,直到角加速度超过  $\dot{\omega}_2$ 。典型 ABS 控制过程如图 1 所示。

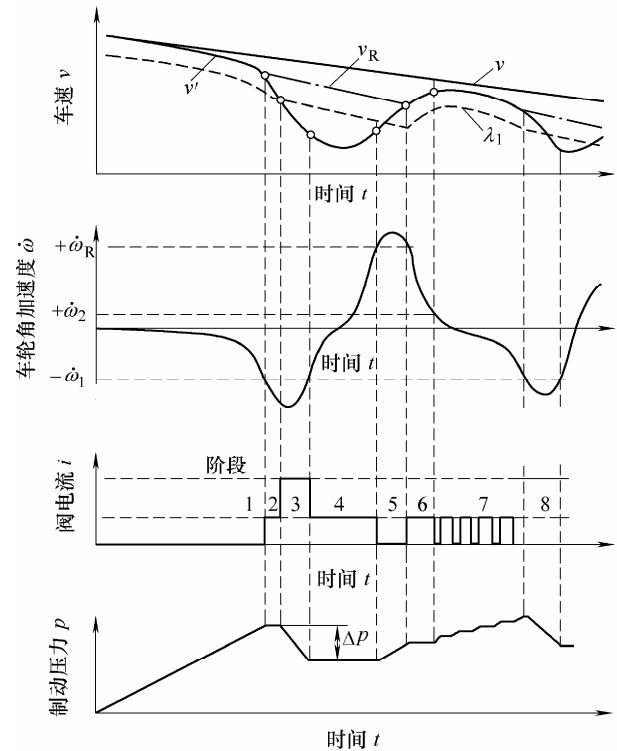


图 1 典型 ABS 控制过程示意图  
v——汽车实际速度 v<sub>R</sub>——汽车参考速度 v'——轮速

$\dot{\omega}_1$  决定系统进入减压或保压的时刻,其数值对于车轮是否抱死及最大滑移率值影响非常大,所以

它是 ABS 最重要的门限值。 $\dot{w}_1$  必须大于惯量车轮在高附着路面达到峰值附着系数时车轮的减速度,同时小于惯量车轮在低附着路面达到峰值附着系数时车轮的减速度<sup>[8]</sup>。 $\dot{w}_1$  值偏大,车轮制动压力偏高,车轮滑移率偏大增加轮胎磨损,也可能降低路面利用附着系数,低速时车轮很容易抱死; $\dot{w}_1$  门限值偏小时,系统介入减压或保压时间过早,导致车轮制动压力偏低,车轮滑移率较小,影响路面附着系数实际利用率,而且  $\dot{w}_1$  门限过小还会因为路面不平和轮速传感器噪声导致误控制动作,或导致系统进行频繁的增、减压。 $\dot{w}_1$  对 ABS 控制的影响如图 2、3 所示。 $\dot{w}_1$  值受路面附着系数的影响很大,在其他情况相同时,高附着路面应具有较大的  $\dot{w}_1$  门限,而低附着路面应具有较小的  $\dot{w}_1$  门限。不同车辆、不同轴荷、车轮转动惯量及制动系统的特性都会对其数值造成一定的影响。由于 ABS 工作的路况复杂多变,其数值必须根据情况进行自动调整,否则将降低 ABS 系统的控制品质。

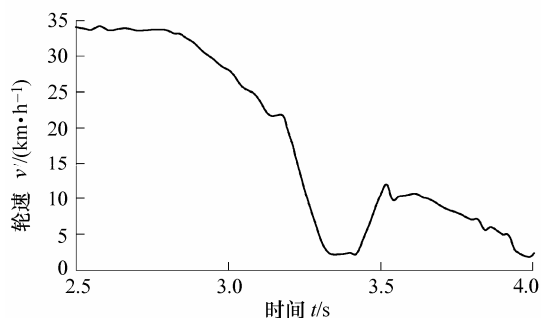


图 2  $\dot{w}_1$  门限值偏大的 ABS 控制曲线

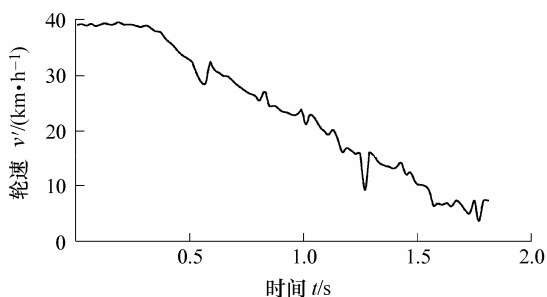


图 3  $\dot{w}_1$  门限值偏小的 ABS 控制曲线

$\dot{w}_2$  决定阶梯增压开始的时刻,它和阶梯增压时间常数一起,决定着车轮滑移率能否较长时间保持在最佳滑移率附近,对路面附着系数利用率和制动减速度均匀性有至关重要的影响。如果  $\dot{w}_2$  值偏大,可能会使系统较早地进入阶梯增压,导致整体滑移率偏大,系统还可能频繁地进行增、减压,影响制动平顺性;如果门限过大,则可能导致完全相反的情况,即车轮角加速度无法达到这一门限值而不能

完成控制状态切换,此时车辆可能出现失控,导致轮速一直处于恢复状态,车辆失去制动力。门限值匹配的困难程度,由此也可见一斑。如果  $\dot{w}_2$  偏小,则进入阶梯增压的时间拖后,影响整体的压力水平,使制动强度降低,整个制动过程控制循环较少。 $\dot{w}_2$  对 ABS 控制的影响如图 4、5 所示。

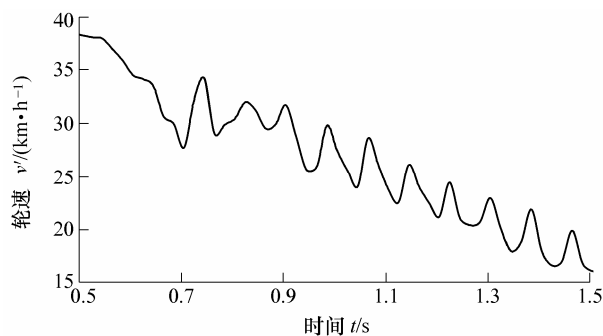


图 4  $\dot{w}_2$  门限值偏大的 ABS 控制曲线

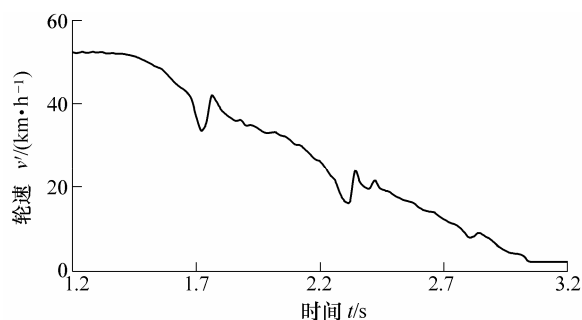


图 5  $\dot{w}_2$  门限值偏小的 ABS 控制曲线

$\dot{w}_k$  决定在减压和保压完成后是否进行增压。当  $\dot{w}_k$  门限值偏大时,系统经过减压后,压力下降很多,车轮角加速度达不到  $\dot{w}_k$  门限,则在较低压力水平长时间保压,这样会导致车轮滑移率偏低,影响附着系数的利用率,严重时导致车辆制动力不足,而且在路面附着系数较高时轮速因为惯性迅速变大,甚至超过车速,图 6 曲线清楚地说明了这一点,而且在轮速再次下降时还可能导致一系列的误操作;如果  $\dot{w}_k$  值偏小,则系统很容易进入增压状态,会导致轮速在减压后还没有充分恢复,就再次快速下降,使整个制动过程滑移率偏大,影响制动过程平顺性,车轮产生剧烈的震动。严重时,系统会对车轮频繁地反复减压、增压,且减压不足,车轮趋于抱死。 $\dot{w}_k$  对 ABS 控制的影响如图 6、7 所示。

阶梯增压的时间常数决定了系统增压的速率。设置阶梯增压是为了使车轮滑移率较长时间的处于较低的滑移率范围内,当车辆减速度超过  $\dot{w}_1$  门限后,再次进行减压。所以,阶梯增压速率过快,则车轮滑移率增加太快,迅速进入减压状态,使车轮不能较长时间的保持在最佳滑移率附近,频繁地增压、减压,使制动过程感觉粗暴,制动减速度也不

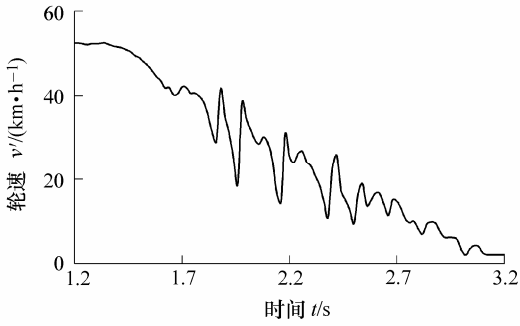


图6  $\dot{w}_k$  门限值偏大的 ABS 控制曲线

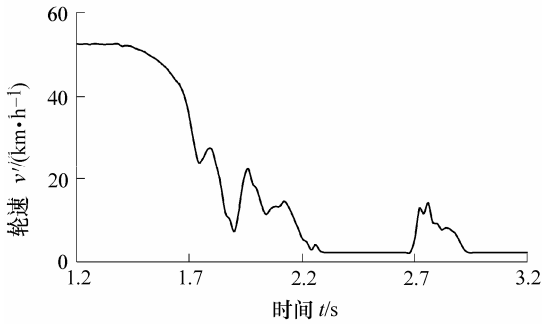


图7  $\dot{w}_k$  门限值偏小的 ABS 控制曲线

均匀;反之,则制动压力长时间的保持较低压力水平,滑移率偏小,降低了附着系数利用率,使制动距离变长,严重时出现制动力不足甚至失去制动力。频繁的增压减也影响了制动过程的平顺性和地面附着力的充分利用。阶梯增压过快、过慢对 ABS 控制的影响如图 8、9 所示。

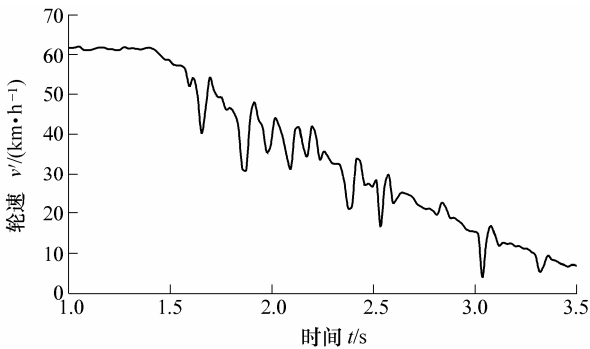


图8 阶梯增压速率偏大的 ABS 控制曲线

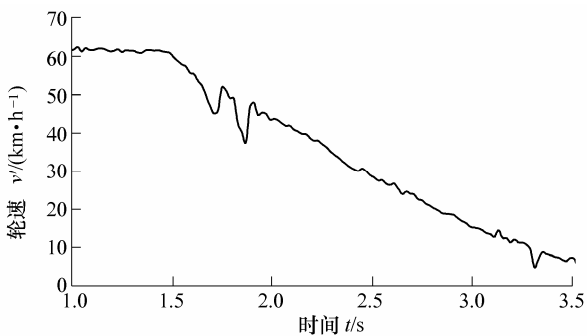


图9 阶梯增压速率偏小的 ABS 控制曲线

$S_1$  和  $S_2$  主要取决于当前路面最佳滑移率的识

别结果,且  $S_1$  只在第一个控制循环起作用,  $S_2$  在识别低附着路面时起作用。阶梯减压只在低附着路面车轮角加速度无法恢复到  $\dot{w}_2$  时起作用,从试验结果来看,这种情况极少出现。

试验结果表明:对 ABS 控制效果影响最大的是  $\dot{w}_1$ 、 $\dot{w}_2$ 、 $\dot{w}_k$  及阶梯增压控制的增压时间常数和保压时间常数。本文提出的逻辑门限值自调整算法也主要针对这四个门限值。其他门限对整体控制效果的影响明显小于以上四个门限值,试验标定后即设定为固定值。

以上针对各门限值单独进行了分析,专门选取了一些极端情况说明它们对 ABS 控制的影响规律。实际上它们对 ABS 控制的影响是互相耦合的,在实际调整过程中要根据试验结果综合整定。

## 2 逻辑门限值自调整算法

门限值匹配是 ABS 开发中耗时最长也是最关键的环节。不同的路面情况往往需要不同的门限值,而汽车行驶的路面状况又是复杂多变的,这大大增加了门限值匹配与控制的难度。提高 ABS 控制的自适应性一直是研究的热点。文献[9]提出了按照一定的算法根据车身参考减速度、参考车速、最新控制循环的最大滑移率等因素确定  $\dot{w}_1$  数值的自适应策略,试验结果表明这样处理改善了 ABS 的控制效果和适应性。本文在分析了各门限值对 ABS 控制效果的影响规律与程度的基础上,借鉴自适应控制中的自校正调节器思想,设计算法对 ABS 最主要的几个门限值进行更全面、精确的自动调整,以期获得更好的控制效果。

自校正的概念是由 KALMAN<sup>[10]</sup>在 1958 年首先提出的。自校正控制系统是主要的自适应控制系统之一。因为其原理简单、容易实现,现已广泛地用在参数变化、有迟延和时变过程特性,及具有随机扰动的复杂系统。借鉴自校正调节器思想,针对汽车 ABS 特点提出的自调整算法如图 10 所示<sup>[11]</sup>。

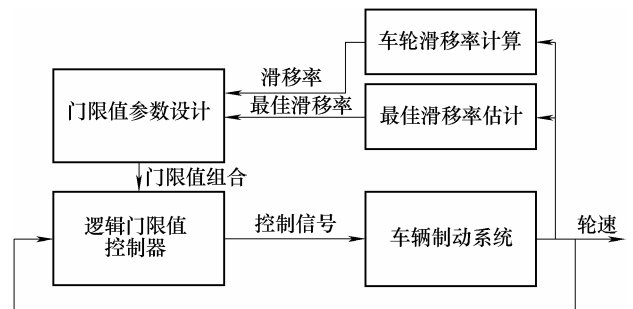


图10 门限值自调整算法原理图

车轮滑移率计算模块根据参考车速、轮速及其历史信息,计算出当前滑移率和上一 ABS 控制循环的最大滑移率、平均滑移率。

最佳滑移率估计模块根据轮速及其一阶、二阶导数等信息辨识当前路面的峰值附着系数,据此得到最佳滑移率值,并实时递推更新。

门限值参数设计模块根据参考车速、车轮滑移率、某一控制循环的最大滑移率、平均滑移率与最佳滑移率,及各门限值对 ABS 控制的影响规律与程度,按照特定的算法实现对主要门限值的在线自动调整,然后输出给逻辑门限值控制器,实现 ABS 控制。门限值自动调整的目标为使得门限值控制得到的滑移率尽量保持在在线辨识得到的当前路面最佳滑移率附近。由于逻辑门限值控制方法难以建立精确的系统数学模型,所以不便设计最小方差控制律对门限值参数进行修改,门限值校正算法按照试验标定结果与经验规律进行在线运算、调整。具体方法如下。

(1) 通过实车试验标定得到 ABS 在高附着路面(0.8~0.9)与低附着路面(0.1)的两组门限值,这两种路面基本覆盖了汽车行驶路面的附着系数变化范围,将这两组门限值作为边界门限值。

(2) 根据路面附着系数辨识结果,将各门限值在两组边界值之间线性插值,作为各门限值的基值。

(3) 由对控制效果有显著影响的各因素生成门限值的修正值。这些因素包括上一控制循环滑移率的最大值平均值与最佳滑移率的偏差量、当前车速、当前滑移率及其变化率。所有修正值的计算方法为根据各物理量对控制效果的影响规律进行线性化处理,然后通过线性插值得到。线性化处理的相关参数需要根据标定试验结果确定、调整。

(4) 将各门限值的基值与各组修正值叠加,得到当前控制需要的门限值。

控制算法根据相关信息不断实时递推计算、修正各门限值,使控制效果渐趋于 ABS 通过辨识认定的汽车所处工况的最佳状态。

该策略的重要参考值为当前路面最佳制动滑移率及代表当前车辆速度的参考车速值。最佳制动滑移率可根据路面附着系数根据经验公式得到,路面附着系数根据其与轮速的关系式,将其分为 0.1~0.9 之间的若干离散值进行大略的估计。参考车速利用自适应斜率法进行计算,在斜率法基础上根据 ABS 控制过程中每个控制循环的车轮速度信息,在相邻两个控制循环分界点处,对斜率法估算参考车速的初始点、初始参考车速和车身参考减速度进行调整和修正。附着系数与参考车速估计的具体算法

见参考文献[12],在此不再详述。

本文将通过 ABS 在各种典型路面的控制曲线说明该逻辑门限值自调整算法的控制效果。

### 3 试验验证

基于上述控制策略开发了 ABS 系统 ECU。采用 C 语言编写了 ECU 软件代码,主要包括初始化模块、自检模块、轮速采集和处理模块、参考车速计算模块、控制决策模块、电磁阀驱动模块和在线故障诊断模块等。控制器硬件主要包括单片机最小系统、轮速输入处理电路、执行机构驱动电路和通讯电路。ECU 硬件主要实现轮速信号采集、控制运算与决策以及控制指令通过功率放大电路驱动执行机构。对一汽赛宝 SUV 试验车进行改装,安装了 ECU、电磁阀、轮速传感器等 ABS 系统部件。进行了 ABS 控制功能验证和标定试验,最终完成了 ABS 系统开发。试验中,高附着路面为柏油公路,附着系数约为 0.8;低附着路面由铺洒洗涤剂溶液的地板革模拟,附着系数约为 0.15。各种典型路面的 ABS 控制曲线如图 11~14 所示。

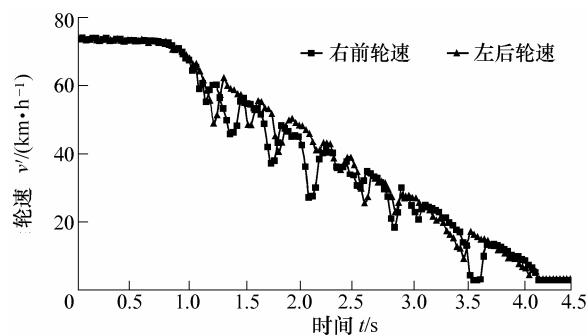


图 11 高附着路面 ABS 控制试验曲线

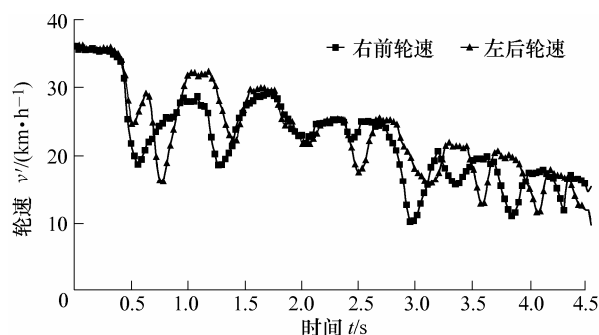


图 12 低附着路面 ABS 试验控制曲线

各主要门限值对 ABS 控制的影响曲线及 ABS 控制试验曲线表明,通过门限值自动调整,所开发的 ABS 实现了在各种制动工况的车轮防抱死控制,在单一路面上制动减速度均匀,高附着路面的制动强度为 0.69,低附着路面的制动强度为 0.13,符合 GB/T 13594—2003《机动车和挂车防抱制动性能和

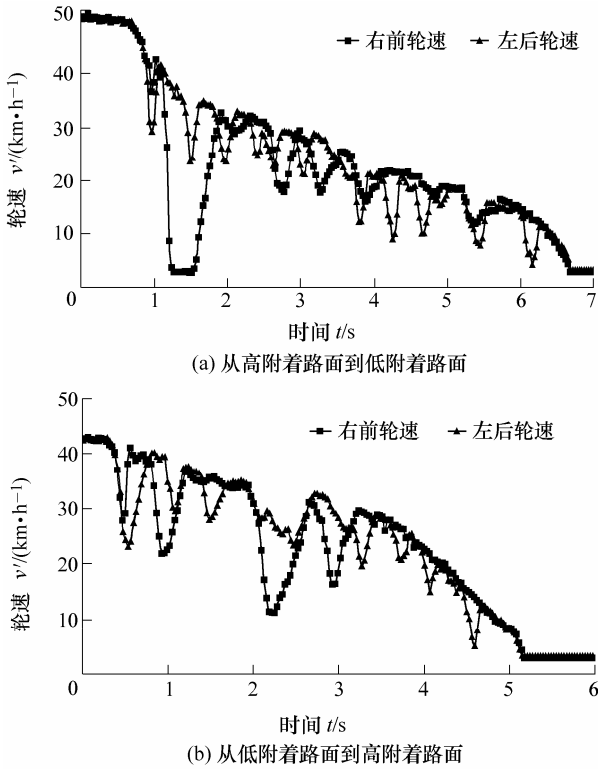


图 13 对接路面 ABS 控制试验曲线

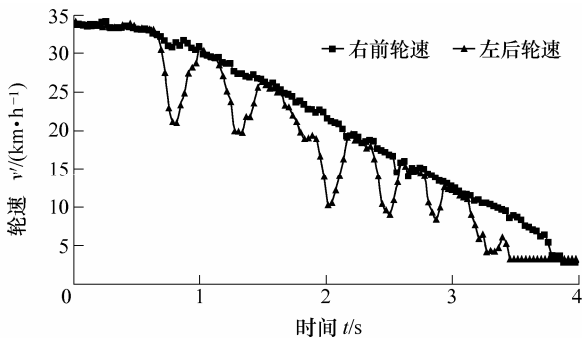


图 14 对开路面 ABS 控制试验曲线

试验方法》和 GB 12676—1999《汽车制动系统结构、性能和试验方法》对 I 类防抱制动系统的性能要求。在对接路面上, 控制器识别了高低附着系数路面的变化, 及时调整增、减压的时机与速率, 实现了不同路面情况的 ABS 控制。在对开路面上, 控制器保证低附着一侧的车轮没有抱死, 使轮胎有较大的侧向附着力; 适当限制或降低了高附着一侧车轮制动压力, 既保证获得较大的地面制动力, 又降低了两侧车轮的制动力差值。这时只需少许的转向盘修正即可保证无制动跑偏。

在不同的路面附着系数、车速或载荷时, ABS 各门限值经常会出现偏高或偏低的情况, 导致控制效果下降。通过门限值自调整策略, 控制器能够一定程度地识别制动工况的变化, 并自动调整各门限值, 实现了在各典型工况都较优的 ABS 控制。

### 4 结论

(1) 通过分析门限值控制理论与试验曲线, 获得了 ABS 各门限值对控制效果的影响程度与影响规律, 确定了需要自动调整的主要门限值, 影响规律为门限值自动调整提供了理论基础。

(2) 通过实车标定与试验验证, 本文提出的逻辑门限值自调整算法能够实时自动调整各主要门限值, 提高了控制算法的自适应性, 实现了在各典型工况都较优的 ABS 控制。该算法不仅改善了控制效果, 还减少了 ABS 的匹配时间, 节约了人力、物力成本。

(3) 所开发的 ABS 工作可靠, 控制效果满足相关国家标准的要求, 为 ABS 产业化提供了前提。

### 参 考 文 献

[1] 宋健, 陈在峰. 制动器耗散功率最大为目标的 ABS 控制方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997, 30(12): 95-98.  
 SONG Jian, CHEN Zaifeng. Control algorithm of ABS based on maximum of the brake decay power[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1997, 30(12): 95-98.

[2] 齐志权, 刘昭度, 马岳峰, 等. 汽车制动防抱系统参考车速确定方法[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 8-11.  
 QI Zhiquan, LIU Zhaodu, MA Yuefeng, et al. Determination of vehicle reference speed for ABS system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(11): 8-11.

[3] 马明星, 毛务本, 朱伟兴. 车辆 ABS 控制算法的理论分析与试验研究[J]. 农业机械学报, 2002, 33(4): 29-33.  
 MA Mingxing, MAO Wuben, ZHU Weixing. Study on control algorithm for antilock braking system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2002, 33(4): 29-33.

[4] MAUER G F. A fuzzy logic controller for an ABS braking system[J]. Transaction on Fuzzy Systems, IEEE, 1995, 3(4): 381-388.

[5] 王国业, 刘昭度, 胡仁喜, 等. 基于等效滑移率变化率的汽车防抱制动系统模糊直接自适应控制[J]. 机械工程学报, 2008, 44(11): 242-247.  
 WANG Guoye, LIU Zhaodu, HU Renxi, et al. Fuzzy logic direct adaptive control of ABS-equipped vehicles based on equivalent slip differential of tire[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(11): 242-247.