

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.047

# 电磁阀阶梯减压控制方法

孙成伟<sup>1</sup> 初亮<sup>1</sup> 郭建华<sup>1</sup> 王彦波<sup>1</sup> 李文惠<sup>2</sup>

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130025; 2. 吉林东光奥威汽车制动系统有限公司, 长春 130012)

**摘要:** 为实现电磁阀减压过程的精确控制, 提出阶梯减压控制方法, 并对控制参数进行了试验标定。通过对电磁阀阀芯受力与电磁阀液压响应特性分析, 指出可通过调节电磁阀压力控制状态和控制信号状态持续时间得到不同的压力变化率, 为阶梯减压控制实现提供依据。电磁阀压力控制状态采用延迟开闭控制方法。电磁阀控制信号状态持续时间受压力变化速率和开关延迟现象的影响, 其中影响压力变化速率的阀口流量系数, 影响开关延迟现象的开启延迟时间与关闭延迟时间通过试验标定。借助试验台架, 对电磁阀不同速率的压力变化试验进行测试, 结果表明所提出的阶梯减压控制方法能够很好地跟随目标压力, 试验偏差可以维持在 1 MPa 以内, 控制精度高。

**关键词:** 液压调节单元; 阶梯减压控制; 控制参数标定; 流量系数; 压力变化率

**中图分类号:** U463.52      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2017)12-0380-06

## Stepped Decompression Control Method of Solenoid Valve

SUN Chengwei<sup>1</sup> CHU Liang<sup>1</sup> GUO Jianhua<sup>1</sup> WANG Yanbo<sup>1</sup> LI Wenhui<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China

2. Jilin Dongguang Aowei Auto. Brake System Co., Ltd., Changchun 130012, China)

**Abstract:** During the hydraulic control unit of ESC (electronic stability control) working process, the main function of the solenoid valve is to adjust the wheel cylinder pressure precisely. However, the linear control mode which can not maintain consistency of control accuracy is susceptible to the state of the hydraulic brake system and the working environment of the solenoid valve, therefore, the stepped decompression control method was proposed, and control parameters were calibrated to realize the precise decompression control. Based on the analysis of the hydraulic valve spool force and hydraulic response characteristics of solenoid valve, it was pointed out that the pressure change rate can be obtained by adjusting pressure control status and duration time of the signal state of solenoid valve to provide basis for the realization of stepped decompression control. The pressure control state of solenoid valve adopted the delay opening and closing control method, which can avoid the frequent switching of the pressure control state between the decompression state and the holding pressure state. The duration time of the solenoid valve control signal state was affected by the pressure change rate and the switching delay phenomenon, in which the flow rate coefficient of the valve port affected the pressure change rate, the opening delay time and the closing delay time affected the switching delay phenomenon were calibrated by the test. With the help of a test bench, different pressure increase rates were tested when the cylinder hydraulic pressure was decreased. Results show that the proposed stepped decompression control method can make the cylinder pressure follow the target pressure well and the bias of experiment data can be maintained within 1 MPa. At the same time, the control method had high control precision.

**Key words:** hydraulic control unit; stepped decompression control; control parameter calibration; flow coefficient; pressure change rate

收稿日期: 2017-03-30 修回日期: 2017-05-08

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA110903)、吉林省产业技术创新战略联盟项目(20150309013GX)、吉林大学研究生创新研究项目(2016078)和吉林省科技发展计划重点科技攻关项目(20170204085GX)

**作者简介:** 孙成伟(1990—),男,博士生,主要从事节能与新能源汽车研究,E-mail: sunchengwei1990@163.com

**通信作者:** 郭建华(1976—),男,副教授,主要从事节能与新能源汽车研究,E-mail: jlu\_guojianhua@163.com

## 引言

电磁阀作为液压调节单元电子稳定控制 (Electronic stability control, ESC) 的主要执行部件<sup>[1-2]</sup>, 在进行车身稳定性控制<sup>[3-5]</sup>、ABS 控制<sup>[6-11]</sup>等需要液压调节单元参与的过程中, 都需要通过对电磁阀的控制得到精确的目标轮缸压力。目前对于 ESC 电磁阀的控制, 通常采用线性压力控制, 其实质是通过控制电磁阀线圈电流进行轮缸压力跟随控制<sup>[12-13]</sup>, 但线性压力控制受到轮缸压力体积 (Pressure volume, PV) 特性的影响, 压力变化速率的可调范围受限<sup>[14]</sup>, 同时线圈电流容易受到温度和驱动电压变化的影响。

为避免制动轮缸 PV 特性和电磁阀工作环境的影响, 针对电磁阀减压控制, 本文提出从压力控制状态切换和控制状态持续时间的角度进行阶梯控制的方法, 并对状态持续时间中控制参数进行试验标定, 利用不同减压速率的压力变化试验进行验证, 以期阶梯减压控制方法的实现提供依据。

## 1 电磁阀基本构型和受力分析

电磁阀利用动铁与定铁在电磁场的作用下, 克服阀芯上所受到的其他阻力, 从而实现电磁阀进液孔和出液孔的导通与关闭<sup>[15-17]</sup>。在阀芯的运动过程中, 主要受到电磁力  $F_m$ 、弹簧力  $F_s$ 、液压力  $F_h$ 、摩擦力  $F_f$  和阻尼力  $F_v$  的作用, 阀芯极限位置时还受上限位的作用力  $F'_N$  和阀座的作用力  $F_N$ , 受力分析如图 1 所示。

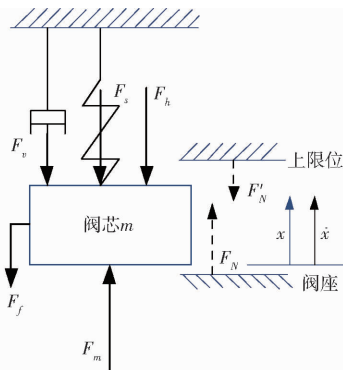


图 1 电磁阀阀芯受力分析

Fig. 1 Analysis on force of spool

根据阀芯受力有关系<sup>[18-20]</sup>

$$m \ddot{x} = F_m - F_s - F_h - F_f - F_v \quad (1)$$

式中  $m$ ——阀芯质量  $x$ ——阀芯位移

由于弹簧力、摩擦力、阻尼力与液压力相比, 数量级较小, 因而电磁力主要用于克服液压力。其中电磁力与阀芯的位移和电流成正比, 液压力与阀口两端压力和阀芯有效受力面积成正比。

通过阀芯受力分析可知, 阀芯的位移以及位移变化速率的大小受电流和阀口压差等因素的综合影响, 并影响电磁阀的响应特性。

## 2 电磁阀液压响应特性分析

为了获得电磁阀阶梯减压控制的控制变量, 需要对电磁阀的液压响应特性进行试验研究<sup>[21-22]</sup>, 为此搭建了 ESC 液压调节单元的试验台架。

取占空比为  $D$ , 频率为  $f$ , 通过给定不同的占空比和频率, 在同一个初始轮缸压力下, 进行轮缸的减压试验, 如图 2 所示。

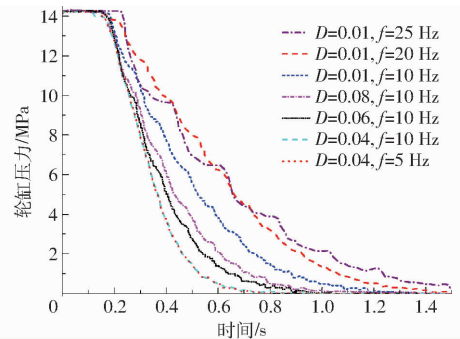


图 2 电磁阀的液压响应曲线

Fig. 2 Hydraulic response curves of solenoid valve

由图 2 可知, 控制频率和占空比对于轮缸压力变化率有较大影响, 以  $D = 0.01, f = 25 \text{ Hz}$  与  $D = 0.04, f = 10 \text{ Hz}$  轮缸压力曲线变化为例, 虽然一个周期内电磁阀供电时间相同, 但轮缸压力变化速率不同。具体原因可由图 3 分析得到, 这主要是由电磁阀的开启与关闭延迟时间导致的。

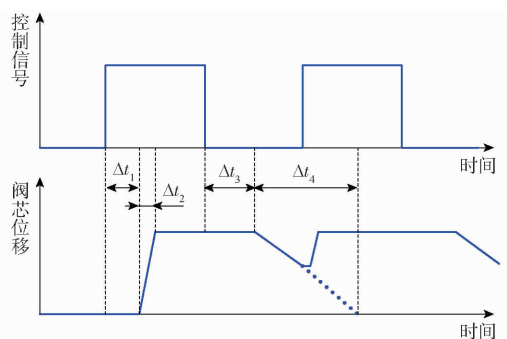


图 3 阀芯运动响应示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spool movement response

电磁阀开启延迟时间为

$$t_{on} = \Delta t_1 + \Delta t_2 \quad (2)$$

式中  $\Delta t_1$ ——阀芯开启滞后时间

$\Delta t_2$ ——阀芯开启运动时间

电磁阀关闭延迟时间为

$$t_{off} = \Delta t_3 + \Delta t_4 \quad (3)$$

式中  $\Delta t_3$ ——阀芯关闭滞后时间

$\Delta t_4$ ——阀芯关闭运动时间

以关闭延迟时间为例, 当电磁阀关闭时间  $T_{off} \gg$

$t_{off}$ 时,电磁阀的阀芯位移可恢复至初始状态,电磁阀完全关闭,此时轮缸压力表现出间断性变化,压力变化率小;当电磁阀的关闭时间  $0 < T_{off} < t_{off}$ 时,电磁阀的阀芯位移还未达到初始状态就要继续开启,电磁阀并未完全关闭,此时轮缸压力连续变化,压力变化率大。

根据上述分析,对于电磁阀的阶梯控制,可通过调节电磁阀控制信号状态持续时间,并考虑电磁阀开启和关闭过程延迟时间的影响,实现轮缸压力变化率的调节。

### 3 电磁阀阶梯减压控制

阶梯减压控制需要确定两个关键控制量,即压力控制状态和状态持续时间。

#### 3.1 压力控制状态

压力控制状态判断用于实现轮缸减压和保压过程的切换,在进行压力控制状态判断时需要考虑到控制状态的切换频率,由于电磁阀主要控制元件为MOSFET,在频繁的开关过程中,容易产生较大的驱动端热负荷,严重影响到电磁阀的使用寿命,本文将选取压力开关延迟控制方法,以便减小控制状态的切换次数,如图4所示。

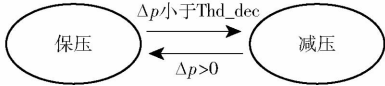


图4 压力控制状态切换

Fig.4 State switch of pressure control states

$\Delta p$  为压力偏差,是制动系统实际压力与目标压力之间的差值,  $Thd\_dec$  为保压至减压过程的切换门限,门限值的选取需要考虑压力的波动和电磁阀开闭时间引起的压力变化。

#### 3.2 状态持续时间

在状态持续时间内,阀口处于完全开启状态,压力变化速率将以当前状态的最大速率进行变化,同时由于阀口的开启与关闭过程中存在延迟现象,容易导致出现压力超调现象,因而在状态持续时间的确定中,当前状态的压力变化速率和开关延迟现象都需要考虑,状态持续时间为

$$T_{on} = \frac{\Delta p}{\dot{p}} + \Delta T_x \quad (4)$$

其中 
$$\dot{p} = \frac{dp}{dt} = \frac{dp}{dV} \frac{dV}{dt} = \frac{dp}{dV} q_x \quad (5)$$

$$q_x = A_x c_q \sqrt{\frac{2\Delta p_x}{\rho}} \quad (6)$$

式中  $T_{on}$ ——状态持续时间

$\dot{p}$ ——当前状态的压力变化率

$\Delta T_x$ ——电磁阀开启和关闭过程延迟时间

$c_q$ ——流量系数

$\rho$ ——制动液密度  $A_x$ ——流通面积

$\Delta p_x$ ——阀口工作压力

$\frac{dp}{dV}$  通过轮缸 PV 特性转换得到。

联立式(5)、(6),可得

$$\dot{p} = A_x c_q \frac{dp}{dV} \sqrt{\frac{2\Delta p_x}{\rho}} \quad (7)$$

式(7)中,其他参数可通过电磁阀体参数、传感器信号、轮缸特性得到,而阀口流量系数  $c_q$  无法确定,成为压力变化率确定的关键,可通过试验标定的方法得到。

在电磁阀开启与关闭过程中,由于电流响应延迟和阀芯位移惯性,导致阀口不能及时地开启与关闭,其间会导致液压响应的延迟,如图5所示。

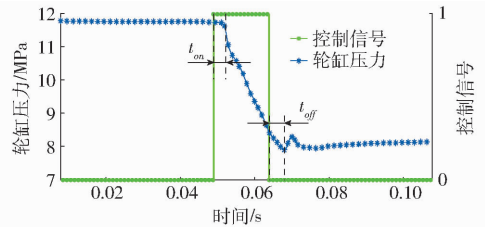


图5 控制信号下轮缸压力变化

Fig.5 Wheel cylinder pressure changes under control signal

在减压过程中,开启延迟时间内轮缸压力并没有进入减压阶段,关闭延迟时间内轮缸压力依然处于减压过程中,因而需要确定这两个延迟时间常数,从而修正状态持续的时间。

在电磁阀开启和关闭过程延迟时间  $\Delta T_x$  计算中,电磁阀前一周期工作状态对其影响较大,若电磁阀前一周期处于关闭状态,则  $\Delta T_x = t_{on} - t_{off}$ ;若电磁阀前一周期处于开启状态,则  $\Delta T_x = -t_{off}$ 。可利用台架试验对  $t_{on}$  和  $t_{off}$  两个时间常数进行试验标定。

### 4 控制参数标定

根据电磁阀阶梯减压控制分析可知,需要标定阀口流量系数  $c_q$  和电磁阀开启延迟时间  $t_{on}$  与关闭延迟时间  $t_{off}$ ,最终得到精确的状态持续时间  $T_{on}$ 。

#### 4.1 阀口流量系数 $c_q$

阀口流量系数  $c_q$  与液流雷诺数有关,当雷诺数  $Re > 10^5$  时,阀口流量系数可认为是一个常数,通过试验标定的方法可以确定<sup>[23]</sup>,如图6所示,图中  $p_{wh1}$  为轮缸压力,  $p_{wh2}$  为低压蓄能器压力,  $d_x$  为阀口流通直径,  $u$  为输入变量。利用实际压力曲线的变化率与估算压力曲线的变化率进行标定,通过修正  $c_q$ ,可得到理想的结果。

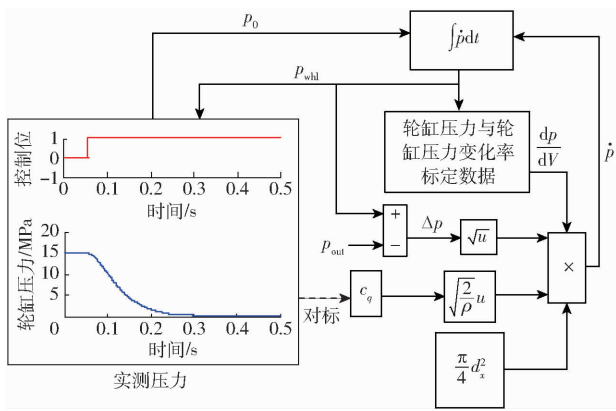


图 6 阀口流量系数标定

Fig. 6 Flow coefficient calibration of valve port

在进行阀口流量系数  $c_q$  标定过程中,实际压力曲线与估算压力曲线可实时在线获得,利用图 6 所述方法,获取的实测轮缸压力,通过压力变化率的积分,得到轮缸的估算压力,利用轮缸的估算压力与实测压力的贴合程度选取合适的阀口流量系数  $c_q$ 。具体的标定结果如图 7 所示,通过修正  $c_q$ ,获取轮缸从 15 MPa 减压过程中实际压力曲线与估算压力曲线,相比  $c_q$  选取 0.6 或者 0.8,  $c_q$  选取 0.7 时与实测值更加贴合,可将其作为阀口流量系数的标定值。

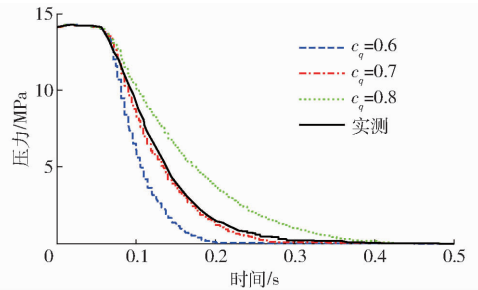


图 7 不同流量系数下的压力估算曲线

Fig. 7 Pressure estimation curves of different flow coefficients

#### 4.2 电磁阀开启延迟时间 $t_{on}$ 与关闭延迟时间 $t_{off}$

由阀芯受力关系可知,电磁阀阀芯的运动受到阀口压差的影响,在不同的阀口压差下,电磁阀的开启与关闭时间不同,可通过给定不同阀口压差下驱动信号与轮缸压力变化之间的时间差求得。

由于电流响应延时和阀芯位移耗时使得常闭电磁阀打开与关闭过程存在延时,给定轮缸初始压力为 12 MPa,电磁阀在给定的时间段内进行阶梯减压,如图 8a 所示,通过 8 个阶梯减压过程,实现了轮缸的减压。通过局部分析电磁阀阶梯减压过程,以第 2 个阶梯减压过程为例,如图 8b 所示,可以看出,在电磁阀压差为 7.055 MPa 时,电磁阀开启时间为 4 ms,在电磁阀压差为 4.683 MPa 时,电磁阀关闭时间为 3 ms。

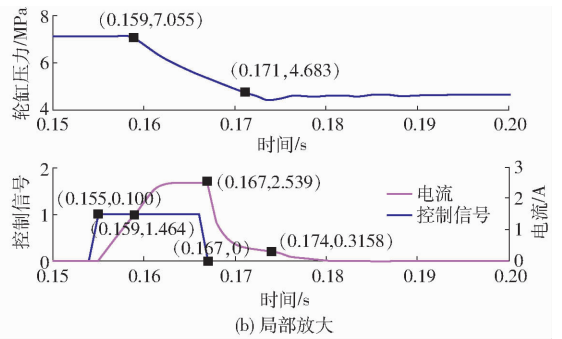
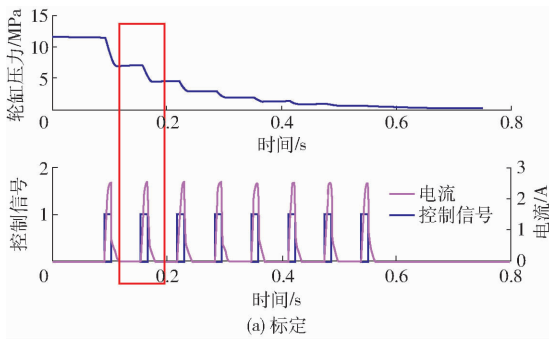


图 8 电磁阀阶梯减压过程

Fig. 8 Step pressure control process

统计电磁阀不同压差条件下的开启延迟时间和关闭延迟时间,如图 9、10 所示。对于开启延迟时间,电磁力需要克服阀口液压力,延迟时间会随

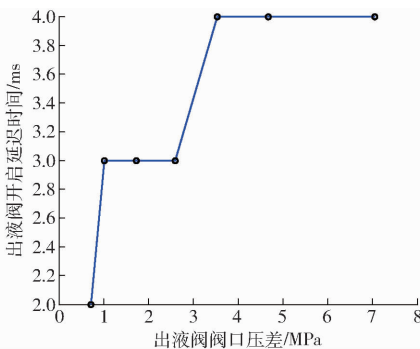


图 9 电磁阀阀口压差与开启延迟时间

Fig. 9 Relationship of pressure drop and opening delay time

着阀口压差的增大而逐渐增大(图 9);对于关闭延迟时间,液压力促使阀口回到初始状态,延迟时间随阀口压差的增大而逐渐降低(图 10)。因而在进行电磁阀开启与关闭过程延迟时间获取时,可利用当前阀口压差状态,通过插值法获取相应状态下的延迟时间。

### 5 试验验证

利用实车液压单元和回路,将 MicroAutobox 作为控制单元,驱动单元采用 Rapid Prototype 实现电磁阀开闭时间控制,搭建了液压制动系统的半实物仿真试验台架,试验台架如图 11 所示,测试了轮缸压力对于不同压力变化率的跟随情况。

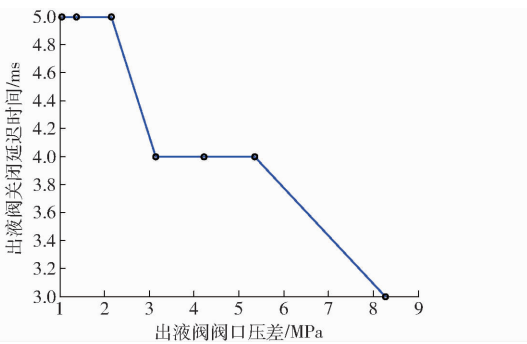


图10 电磁阀阀口压差与关闭延迟时间

Fig. 10 Relationship of pressure drop and closing delay time

在阶梯减压试验过程中,轮缸初始压力 8 MPa 左右,让轮缸压力分别跟随 3、6、12 MPa/s 的减压速率进行减压,试验结果如图 12 所示。

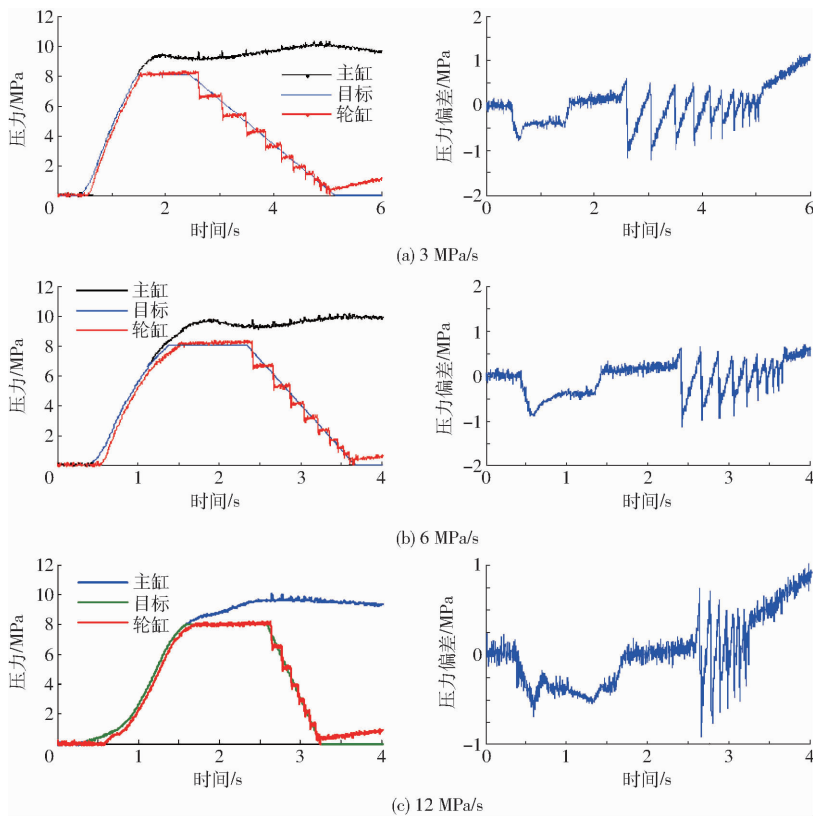


图12 不同减压速率下的轮缸压力变化曲线和压力偏差

Fig. 12 Pressure change curves of wheel cylinder and pressure deviation

持在 1 MPa 以内。同时在相同的减压区间变化时,随着减压速率的增大,电磁阀开启次数变少,开启时间增长,减压速率的变化越接近电磁阀口的最大减压速率,控制越精确。

## 6 结论

(1) 提出了在阶梯减压过程中,可通过控制压力控制状态和状态持续时间实现。在状态持续时间

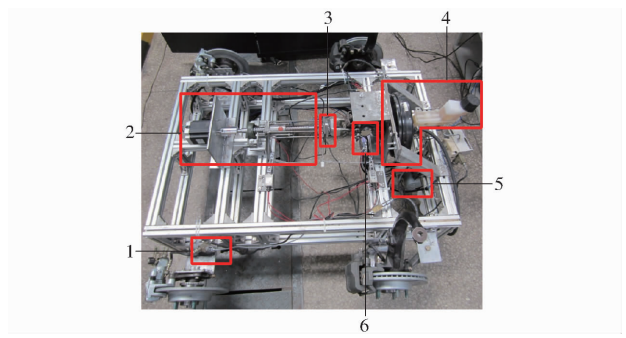


图11 试验台架

Fig. 11 Test bench

1. 压力传感器 2. 制动实施装置 3. 踏板力传感器 4. 制动操纵机构 5. ESC 6. 位移传感器

在不同的减压速率需求下,轮缸压力都可以很好的阶梯跟随目标压力的需求,试验偏差都可以维

计算中,考虑到了当前状态的压力变化速率和开关延迟现象的影响,使得阶梯压力控制效果更加精确。

(2) 给出了阀口的流量系数  $c_q$ 、电磁阀开启延迟时间  $t_{on}$ 、关闭延迟时间  $t_{off}$  的标定方法,为阶梯压力控制参数的选取提供了试验依据。

(3) 利用台架试验进行了电磁阀不同减压速率下的压力变化控制,试验结果表明,该控制方法目标压力跟随性好,控制精度高。

## 参 考 文 献

- 1 初亮, 马文涛, 祁富伟, 等. 集成式电子驻车系统起步辅助控制策略研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 361 - 366. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160351&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160351&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.051.  
CHU Liang, MA Wentao, QI Fuwei, et al. Start assist control strategy of integrated electronic parking brake system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 361 - 366. (in Chinese)
- 2 张小龙, 丁文俊, 葛胜迅, 等. 乘用车驻车制动性能转毂测试与评价方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 361 - 367. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170346&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170346&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.046.  
ZHANG Xiaolong, DING Wenjun, GE Shengxun, et al. Test and evaluation method for parking brake performance of passenger vehicle based on dynamometer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 361 - 367. (in Chinese)
- 3 ZHAI L, SUN T, WANG J. Electronic stability control based on motor driving and braking torque distribution for a four in-wheel motor drive electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(6): 4726 - 4739.
- 4 CHEN B C, KUO C C. Electronic stability control for electric vehicle with four in-wheel motors[J]. International Journal of Automotive Technology, 2014, 15(4): 573 - 580.
- 5 DRAGNE F D, ALIRAND M, NEVES W, et al. ESC hydraulic circuit modeling and model reduction in the aim of reaching real time capability[C]. SAE Paper 2013 - 36 - 0013, 2013.
- 6 LI W, DU H, LI W. A new torque distribution strategy for blended anti-lock braking systems of electric vehicles based on road conditions and driver's intentions[J]. SAE International Journal of Passenger Cars—Mechanical Systems, 2016, 9(1): 107 - 115.
- 7 SIVARAMAKRISHNAN S, SINGH K B, LEE P. Experimental investigation of the influence of tire design parameters on anti-lock braking system (ABS) performance[J]. SAE International Journal of Passenger Cars—Mechanical Systems, 2015, 8(2): 647 - 658.
- 8 MIRZAEINEJAD H, MIRZAEI M. Optimization of nonlinear control strategy for anti-lock braking system with improvement of vehicle directional stability on split- $\mu$  roads[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 46: 1 - 15.
- 9 ZHANG J L, YIN C L, ZHANG J W. Design and analysis of electro-mechanical hybrid anti-lock braking system for hybrid electric vehicle utilizing motor regenerative braking[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(1): 42 - 49.
- 10 MIRZAEI M, MIRZAEINEJAD H. Optimal design of a non-linear controller for anti-lock braking system[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2012, 24: 19 - 35.
- 11 张忠富, 王国业, 毛恩荣, 等. 基于电磁机械耦合再生制动系统的 ABS 控制[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 323 - 329. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160243&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160243&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.043.  
ZHANG Zhongfu, WANG Guoye, MAO Enrong, et al. ABS control of electric vehicle based on electromagnetic-mechanical coupled regenerative braking system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 323 - 329. (in Chinese)
- 12 ZHAO X, LI L, SONG J, et al. Linear control of switching valve in vehicle hydraulic control unit based on sensorless solenoid position estimation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4073 - 4085.
- 13 王兆伟. 制动能量回收系统 HCU 的特性研究和仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- 14 崔海峰. 汽车 ABS/ASR 集成系统及轮缸压力精细调节研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2005.
- 15 孟爱红, 王治中, 宋健, 等. 汽车 ESP 液压控制单元关键部件建模与系统仿真[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 1 - 5. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20130201&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130201&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.001.  
MENG Aihong, WANG Zhizhong, SONG Jian, et al. Critical component modeling and system simulation of hydraulic control unit of automotive electronic stability program[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 1 - 5. (in Chinese)
- 16 DELL A, KRUS P. Modelling and experimental validation of a nonlinear proportional solenoid pressure control valve[J]. International Journal of Fluid Power, 2016, 17(2): 90 - 101.
- 17 BRAUN T, REUTER J. Sliding mode observation with iterative parameter adaption for fast-switching solenoid valves[M]//RAUH A, SENKEL L. Variable-Structure Berlin: Approaches. Springer International Publishing, 2016: 189 - 212.
- 18 王伟玮, 宋健, 李亮, 等. 高速开关阀在高频 PWM 控制下的比例功能[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2011, 51(5): 715 - 719.  
WANG Weiwei, SONG Jian, LI Liang, et al. High speed on-off solenoid valve with proportional control based on high frequency PWM control[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2011, 51(5): 715 - 719. (in Chinese)
- 19 初亮, 祁富伟, 王彦波, 等. 汽车防抱死系统电磁阀的阶梯控制[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2014, 44(4): 907 - 911.  
CHU Liang, QI Fuwei, WANG Yanbo, et al. Stepped control of solenoid valve in vehicle ABS[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2014, 44(4): 907 - 911. (in Chinese)
- 20 MENG F, ZHANG H, CAO D, et al. System modeling, coupling analysis, and experimental validation of a proportional pressure valve with pulsewidth modulation control[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(3): 1742 - 1753.
- 21 欧阳. 轿车稳定性控制系统轮缸压力控制和估算算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- 22 王伟玮, 宋健, 李亮, 等. ESP 液压执行单元柱塞泵动态特性仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 1 - 6. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20120401&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120401&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.001.  
WANG Weiwei, SONG Jian, LI Liang, et al. Dynamics characteristic simulation and test of pump of hydraulic control unit of ESP [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 1 - 6. (in Chinese)
- 23 王积伟, 章宏甲, 黄谊. 液压传动[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2007.