

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.001

汽车 ESP 液压控制单元关键部件建模与系统仿真*

孟爱红^{1,2} 王治中¹ 宋健¹ 潘宁¹

(1. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084; 2. 装甲兵工程学院机械工程系, 北京 100072)

摘要: 以汽车电子稳定性程序(ESP)液压控制单元的回油泵、高速开关阀等关键部件为研究对象,推导其数学模型,利用 AMESim、Matlab 软件建立 ESP 液压系统回油泵、高速开关阀运动的联合仿真模型,通过仿真得出这些液压元件参数对主动增压下制动缸压力调节的影响,为提高回油泵效率、实现高速开关阀的线性控制功能提供参考依据。

关键词: 电子稳定性程序 高速开关阀 液压 建模 仿真

中图分类号: U27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)02-0001-05

Critical Component Modeling and System Simulation of Hydraulic Control Unit of Automotive Electronic Stability Program

Meng Aihong^{1,2} Wang Zhizhong¹ Song Jian¹ Pan Ning¹

(1. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. Department of Mechanical Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: Taking the piston pump and high speed on-off valve, the crucial parts of automotive electronic stability program (ESP). Their mathematical models were established. Besides, the co-simulation model of ESP hydraulic control unit (HCU) was built up by AMESim and Matlab, which was also verified by test. The simulation model described the motion intrinsic characteristic of the piston pump and high speed on-off valve. Consequently, the effect of those components' parameters on the adjustment of braking pressure during active boosting was analyzed. The result can provide references for the design and development of ESP, especially for improving the efficiency of the pump and the linear control performance of the high speed on-off valve.

Key words: Electronic stability program High speed on-off valve Hydraulics Model Simulation

引言

汽车电子稳定性程序(Electronic stability program, ESP)是一种高智能化的主动安全系统,包含了防抱死制动系统(ABS)、驱动力控制系统(TCS)及横摆力矩控制系统(AYC),在制动、驱动和转向情况下对汽车安全稳定行驶提供有力的支持。ESP系统由电子控制单元(ECU)、液压控制单元(HCU)和传感器组成。ESP性能、控制效果与液控

单元的性能密切相关。当HCU对于指令的执行不彻底或其节奏跟不上时,将导致ECU指令执行后,ESP得不到预期控制的效果,从而影响整套ESP系统的性能。

对于ESP系统中的HCU,国外学者进行了大量的研究^[1~5]。近年来,国内关于ESP液压控制单元的研究有了快速发展^[6~9],但国内有关汽车ESP液控单元的文献中,对HCU的建模大多止于标准件层面,只能对软件提供的可变参量进行分析,因此很难

收稿日期: 2012-06-29 修回日期: 2012-10-23

* 国家自然科学基金资助项目(50905092)

作者简介: 孟爱红,博士生,装甲兵工程学院讲师,主要从事液压系统建模与仿真研究,E-mail: mahjzm@yahoo.com.cn

通讯作者: 宋健,教授,博士生导师,主要从事汽车动力学研究,E-mail: daesj@tsinghua.edu.cn

深入分析液压元件具体结构及参数对 ESP 性能的影响。虽然国外的 ESP 技术和产品已成熟完善,但发表的 HCU 研究文献多是基于硬件在环等实验得出的结论,并未有从其液压元件内部结构入手进行深入分析的具体研究和方法可供参考。

鉴于此,本文根据 HCU 中回油泵、高速开关阀的结构原理,推导这些关键部件的数学模型,并应用 AMESim、Matlab 软件建立系统联合仿真模型,通过仿真深入分析元件参数对制动轮缸压力调节的影响,为 ESP 的设计开发提供参考依据。

1 ESP 液压控制单元工作原理

ESP 液压控制单元 HCU 原理如图 1 所示,由回油泵、电磁阀、蓄能器、直流电动机组成,设置在制动主缸与车轮制动轮缸之间,根据 ECU 的控制指令,自动调节制动轮缸压力^[7]。

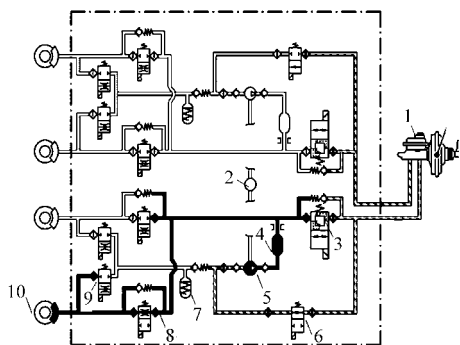


图 1 ESP 液压控制单元原理图

Fig. 1 Layout of hydraulic control unit of ESP

1. 制动主缸 2. 电动机 3. 限压阀 4. 阻尼器 5. 回油泵
6. 吸入阀 7. 蓄能器 8. 增压阀 9. 减压阀 10. 制动轮缸

ESP 系统分 ABS、TCS 和 AYC 3 种工作模式。在 AYC 工作模式下轮缸增压被称为主动增压过程,此时制动踏板未动作,限压阀从常通状态转变为限压状态,吸入阀打开,制动液通过吸入阀、回油泵、阻尼器、增压阀进入轮缸,推动轮缸中的活塞,压紧摩擦片进行制动。本文主要研究回油泵、限压阀对这种模式下轮缸增压过程的影响。

2 ESP 液压控制单元的数学模型

2.1 回油泵数学模型

在液压控制单元中回油泵采用单柱塞泵,由带偏心轮的电动机驱动,在吸、压油阀芯之间形成一个密闭的柱塞腔,如图 2 所示。当柱塞向上运动时,柱塞腔的油由于受到压缩,压力升高,顶开压油阀的球形阀芯,完成压油过程;当柱塞向下运动时,柱塞腔压力降低,吸油阀的挡板阀芯被顶开,完成吸油过程。

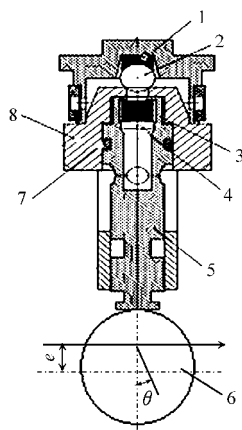


图 2 回油泵结构原理图

Fig. 2 Configuration of piston pump

1. 压油阀弹簧 2. 压油阀芯 3. 吸油阀弹簧 4. 吸油阀芯
5. 柱塞 6. 电动机偏心轮 7. 密封圈 8. 泵体

泵的流量为

$$Q = A_z v_z \quad (1)$$

式中 A_z ——柱塞工作面积

v_z ——柱塞垂直运动速度

柱塞在轴线方向上的位移

$$s = e(1 - \cos\theta) \quad (2)$$

式中 e ——电动机偏心轮偏心量

θ ——偏心轮转动角度

由式(1)、(2)可得

$$Q = \frac{\pi}{4} d^2 e \dot{\theta} \sin\theta = \frac{(\pi d)^2}{2} e n \sin(2\pi n t) \quad (3)$$

式中 n ——电动机转速

2.2 高速开关阀数学模型

ESP 液压控制单元中的增压阀、减压阀、吸入阀和限压阀均为高速开关阀,可见高速开关阀是 HCU 的关键部件。高速开关阀是电、磁、机、液的强耦合系统,以阀口常开的限压阀为例(图 3),阀芯运动受到电磁力、液动力和弹簧力等制约。其运动学方

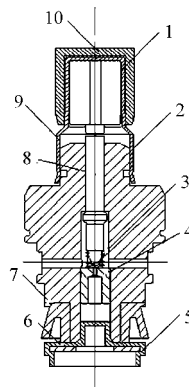


图 3 限压阀结构原理图

Fig. 3 Configuration of chane-over valve

1. 动铁 2. 阀座 3. 回位弹簧 4. 节流器 5. 底封盖 6. 垫圈
7. 唇型密封圈 8. 推杆 9. 隔磁管 10. 封盖

程为

$$m_f \ddot{x}_f = F_x + F_p - F_s - F_B \quad (4)$$

式中 m_f ——阀芯运动件质量

x_f ——阀芯运动件位移

F_x ——电磁力 F_p ——液动力

F_s ——弹簧力

F_B ——粘性阻尼力

液体流经阀芯时产生的液动力对阀芯运动的稳定性具有重要影响。分析稳态液动力时选取介于阀腔入口及节流口的一段流体空间为控制体(图4),对控制体积中的液体应用动量定理,可得阀芯(下端面)所受稳态轴向液动力为

$$F_{stx} = \rho Q v_0 - \rho Q v_j \cos \alpha + p_0 A_1 + \int p_j 2\pi r dr - p_2 A_j \cos \alpha \quad (5)$$

式中 v_0, v_j ——阀腔入口处、节流处流速

p_0, p_j, p_2 ——阀腔入口处、节流处、出口处压力

A_1, A_j ——阀腔喉管处、节流处过流面积

α ——阀座半锥角

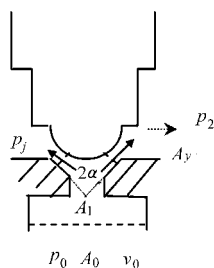


图4 限压阀芯控制体选取示意图

Fig.4 Sketch of control volume of change-over valve

根据阀口流量公式

$$Q = c_d A_j \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$$

其中 $\Delta p = p_2 - p_0$

式中 c_d ——阀的流量系数

$$\rho Q v_0 = \frac{2c_d^2 A_j^2}{A_0} \Delta p \quad (6)$$

$$\rho Q v_2 \cos \alpha = 2c_d A_j \Delta p \cos \alpha \quad (7)$$

根据伯努利方程推导出节流处压力

$$p_j = p_2 - c_d^2 \Delta p \quad (8)$$

考虑到在阀芯上端面作用有背压 p_3 ,当阀芯处于稳定状态时,背压 p_3 即阀出口压力 p_2 ,所以稳态液动力

$$F_{st} = F_{stx} - p_2 A_2 \quad (9)$$

式中 A_2 ——阀座锥角大端面积

将式(6)~(9)代入式(5),可得

$$F_{st} = 2 \frac{c_d^2}{A_0} \Delta p A_j^2 - (p_2 \cos \alpha + 2c_d \Delta p \cos \alpha) A_j + (A_1 - c_d^2 A_{d12}) \Delta p \quad (10)$$

式中 A_{d12} ——阀座导角在水平方向的投影面积

由式(10)可知 F_{st} 是关于阀芯过流面积的二阶方程,阀的结构参数中阀座锥角及入口孔径对该两项有较大的影响权重,除此以外,阀两端压差对液动力影响较大。

3 ESP 液压控制单元的仿真模型

在建立 ESP 液控单元仿真模型时,对回油泵和高速开关阀的仿真模块进行了细化。首先利用 AMESim 软件液压元件设计库(HCD)的功能构建了回油泵的仿真子模型,如图5所示。电动机带动凸轮转动使柱塞腔的体积发生变化,柱塞腔的油压也相应改变使得进油阀芯及压油阀芯交替开合,从而交替完成吸油和压油工作。该子模型体现了单柱塞泵流量及压力的波动性,另外模型增加泄漏模块,可以模拟主要由内泄漏引起的容积损失。因此,该子模型更接近泵的工作实际。

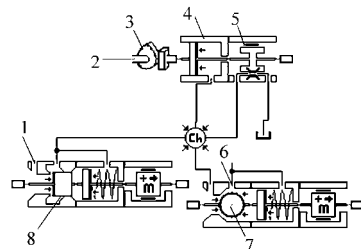


图5 回油泵仿真模型

Fig.5 Simulation model of pump by AMESim

1. 泵吸油口 2. 接电机模块 3. 凸轮 4. 柱塞腔 5. 泄漏模块
6. 泵压油口 7. 压油阀芯 8. 进油阀芯

其次为精确描述高速开关阀阀芯所受的液动力,揭示阀芯运动机理,根据上述高速开关阀的数学模型建立限压阀的 Simulink 模型,封装为 S 函数,令输入为限压阀进、出油口油压,输出为通过限压阀的流量,将其嵌入到用 AMESim 建立的液控单元系统模型中,如图6所示。通过联合仿真,可以分析阀的参数对系统性能的影响。

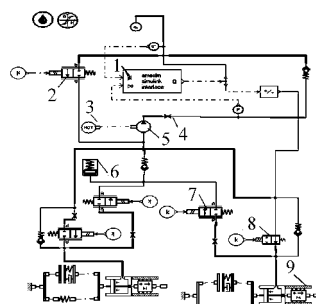


图6 ESP 液压控制单元的仿真模型

Fig.6 Co-simulation model of HCU

1. 限压阀 2. 吸入阀 3. 电动机 4. 阻尼器 5. 回油泵 6. 蓄能器
7. 减压阀 8. 增压阀 9. 制动轮缸

4 仿真分析

4.1 回油泵泵油能力仿真分析

HCU 中吸入阀孔径对回油泵泵油能力的影响如图 7 所示。当吸入阀孔径变大, 泵的吸油管路阻力变小, 此时吸油口压力增大, 更容易顶开进油阀芯, 使得泵油能力加强, 制动轮缸增压速率加快。其次, 减小进油挡板阀芯下端面的有效工作直径, 使得进油阀芯的上下面积差加大, 进油阀芯更能及时关闭, 压油过程延长, 从而提高泵的效率, 轮缸增压速率明显加快, 如图 8 所示。由图 9 可知, 改变回油泵出口连接的阻尼器孔径对轮缸主动增压速率影响不大。理论上提高电动机转速可以增大泵的流量, 但通过仿真分析得出电动机转速在 2 000 r/min 以上时改变转速对回油泵泵油能力影响不大, 此时轮缸主动增压速率影响基本不变, 如图 10 所示。

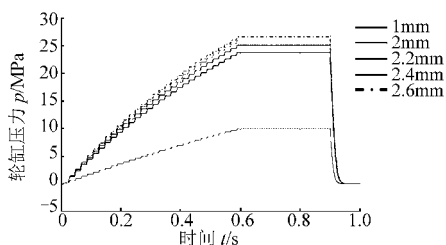


图 7 吸入阀孔径对回油泵泵油能力的影响

Fig. 7 Effect by diameter of pre-charge valve

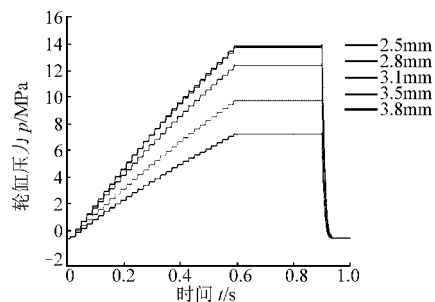


图 8 泵进油阀挡板尺寸对回油泵泵油能力的影响

Fig. 8 Effect by diameter of pump's inlet valve

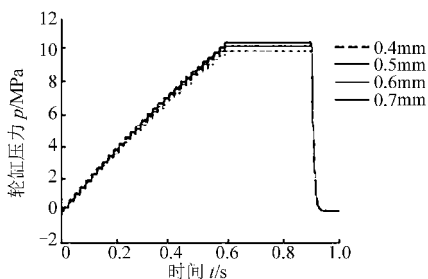


图 9 阻尼器孔径对回油泵泵油能力的影响

Fig. 9 Effect by diameter of pump's damper

4.2 PWM 控制下高速开关阀频率响应仿真分析

应用图 6 所示 HCU 仿真模型, 令吸入阀、增压阀全开, 限压阀采用 4 000 Hz 的 PWM 控制, 对轮缸主动增压过程进行仿真。为验证仿真模型的准确

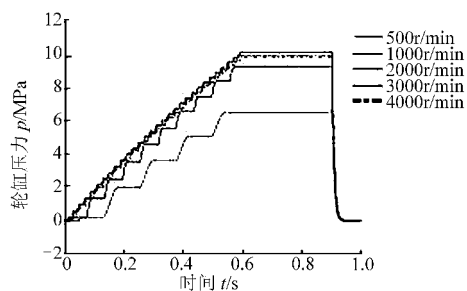


图 10 电动机转速对回油泵泵油能力的影响

Fig. 10 Effect by motor's revolution

性, 在 ESP 硬件在环仿真实验台 (图 11) 上对阀进行相同工况的台架实验。图 12 为 40% 占空比下轮缸压力的实验结果与仿真结果的对比。由图可见, 在高频 PWM 控制下, 限压阀能起到很好的溢流限压作用, 而且仿真结果较好地反映实际的液压系统响应。

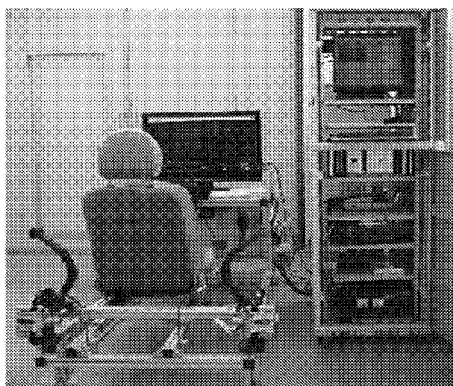


图 11 ESP 硬件在环仿真实验台

Fig. 11 Hardware-in-loop test bench of ESP

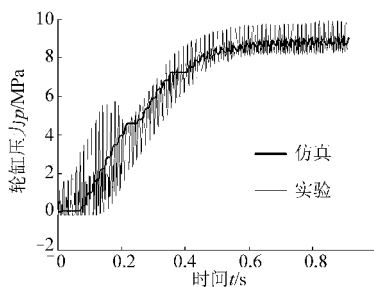


图 12 轮缸压力仿真与实验对比

Fig. 12 Comparison of brake cylinder pressure by test and simulation

在此基础上, 对限压阀在 100 Hz、2 000 Hz 和 5 000 Hz 频率 PWM 控制下的增压过程进行仿真, 得到 40% 占空比下轮缸压力及限压阀芯的位移, 分别如图 13、14 所示。由图可见, 高频 PWM 控制下的高速开关阀与低频 (10 ~ 100 Hz) PWM 控制有着本质的区别^[10]。在低频 PWM 控制下, 高速开关阀处于频繁开关的工作状态, 对轮缸压力的调节产生较大压力波动。在高频 PWM 控制下, 高速开关阀阀芯可以悬浮在某一开度, 使得低成本的高速开关阀实现与比例阀相近的线性控制功能, 从而制动压力的增加过程能够更加平稳精确, 避免高速开关阀的

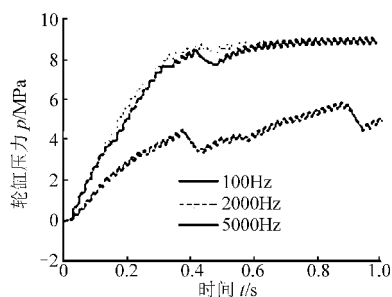


图 13 不同调制频率下高速开关阀的调压性能

Fig. 13 Effect on brake cylinder pressure by PWM frequency

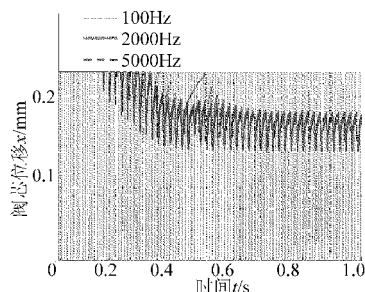


图 14 不同调制频率下高速开关阀的阀芯位移

Fig. 14 Effect on valve displacement by PWM frequency

完全开和关带来的压力波动和噪声。

5 结论

(1) 回油泵的单柱塞结构不可避免地带来输出流量的不连续性,回油泵的吸压油过程并不完全取决于柱塞腔体积变化,还与吸、压油阀芯能否及时配合动作有关。通过仿真得到增大吸入阀孔径和减小进油阀芯下端尺寸可以使得进油阀芯在吸油过程及时打开而在压油过程及时关闭,从而提高回油泵效率。通常增大电动机转速可使泵输出流量增加,而通过仿真得到在 2 000 r/min 以上改变电动机转速对回油泵泵油能力影响不大。

(2) 高速开关阀阀芯运动受到电磁力、液动力和弹簧力等的制约,液动力对阀芯运动的稳定性具有重要影响。在高频 PWM 控制下,一定占空比范围内,高速开关阀阀芯可以悬浮在某一开度达到动态平衡,使得低成本的高速开关阀实现与比例阀相近的线性控制功能。

参 考 文 献

- 1 Aldo Sorniotti, Mauro Velardocchia. Hardware-in-the-loop (HIL) testing of ESP (electronic stability program) commercial hydraulic units and implementation of new control strategies [C]. SAE Paper 2004-01-2770, 2004.
- 2 Manro Velardocchia. A methodology to investigate the dynamic characteristics of ESP and EHB hydraulic units [C]. SAE Paper 2006-01-1281, 2006.
- 3 Wookjin Choi, Hwan Park, Sangcheol lee. Research on the method of improving the pump system [C]. SAE Paper 2004-01-0258, 2004.
- 4 Luigi Petruccelli, Manro Velardocchia, Aldo Sorniotti. Electro-hydraulic braking system modeling and simulation [C]. SAE Paper 2003-01-3336, 2003.
- 5 Ijin Yang, Woogab Lee, Inyong Hwang. A model-based design analysis of hydraulic braking system [C]. SAE Paper 2003-01-0253, 2003.
- 6 祁雪乐, 宋健, 王会义, 等. 基于 AMESim 的汽车 ESP 液压控制系统建模与分析 [J]. 机床与液压, 2005(8): 115~118.
Qi Xuele, Song Jian, Wang Huiyi, et al. Modeling and analysis of vehicle ESP hydraulic control device using AMESim [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2005(8): 115~118. (in Chinese)
- 7 李亮, 宋健, 韩宗奇, 等. 用于电子稳定程序 ESP 在线控制的液压模型和反模型 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(2): 139~144.
Li Liang, Song Jian, Han Zongqi, et al. Hydraulic model and inverse model for electronic stability program online control system [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(2): 139~144. (in Chinese)
- 8 郜大伟. 汽车 ESP 液压调节器建模与轮缸压力估计算法的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.
Gao Dawei. Study on simulation of ESP hydraulic actuator and estimation of wheel cylinder pressure [D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- 9 谢敏松. 汽车 ESP 液压系统动态特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
Xie Minsong. Study on the dynamic characteristics of ESP hydraulic system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007. (in Chinese)
- 10 王伟玮, 宋健. 高速开关阀在高频 PWM 控制下的比例功能 [J]. 清华大学学报, 2011, 51(5): 715~719.
Wang Weiwei, Song Jian. High speed on-off solenoid valve with proportional control based on high frequency PWM control [J]. Journal of Tsinghua University, 2011, 51(5): 715~719. (in Chinese)
- 11 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]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 1~5, 14.
Wang Weiwei, Song Jian, Li Liang, et al. Dynamics characteristic simulation and test of pump of hydraulic control unit of ESP [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 1~5, 14. (in Chinese)
- 12 张小龙, 李亮, 宋健, 等. 汽车稳定性控制系统性能试验与数据处理方法 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 1~6, 34.
Zhang Xiaolong, Li Liang, Song Jian, et al. Performance test and data processing method for vehicle electronic stability control system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 1~6, 34. (in Chinese)