

# 非对称泵控液压系统控制方案及其回路特性仿真分析

王海燕<sup>1</sup>, 袁荷伟<sup>2</sup>, 李峰<sup>3</sup>, 张强<sup>4</sup>

(1. 河北涿州市技师学院 机械制造系, 河北 保定 072750; 2. 河南交通职业技术学院 汽车学院, 河南 郑州 450000;  
3. 河北科技大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050011; 4. 河南睿智液压设备有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 为了解决闭式泵控系统液压缸流量不匹配问题并提升液压系统的能量效率, 设计了一种变排量、变转速的非对称泵控液压系统控制方案。通过综合控制两个自由度来达到调控排量, 实现了液压缸伸缩位置与运动速度的控制功能。此时控制转速和控制排量发生叠加, 从而获得了更快的系统响应速度。最后, 分别从速度开环、闭环控制方案, 以及负载特性等方面对非对称泵控液压系统控制方案及其回路特性展开了仿真分析。研究结果表明: 速度开环控制回路系统形成了不对称的速度, 速度闭环控制回路系统则表现出更稳定的状态, 其可以达到更高的位置控制精度, 达到平稳运行状态, 获得更优位置控制性能; 闭环速度可以保持稳定状态, 基本不受负载的影响。

**关键词:** 泵控液压系统; 回路特性; 液压缸流量; 变排量; 变转速

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.02.025

**中图分类号:** TH137      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 02-0162-05

## Simulation analysis on control scheme and loop characteristics for asymmetric pump-controlled hydraulic system

Wang Haiyan<sup>1</sup>, Yuan Hewei<sup>2</sup>, Li Feng<sup>3</sup>, Zhang Qiang<sup>4</sup>

(1. Department of Machinery Manufacturing, Hebei Zhuozhou Technician College, Baoding 072750, China;  
2. School of Automotive, Henan Vocational and Technical College of Communications, Zhengzhou 450000, China;  
3. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050011, China;  
4. Henan Ruizhi Hydraulic Equipment Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of hydraulic cylinder flow mismatch in closed pump control system and improve the energy efficiency of hydraulic system, a control method of asymmetric pump-controlled hydraulic system with variable displacement and variable rotation speed was designed. Then, through the comprehensive control of two degrees of freedom, the displacement was adjusted, and the control function of telescopic position and movement speed of the hydraulic cylinder was realized. Meanwhile, the control speed and control displacement were overlapped to obtain a faster system response speed. Furthermore, the control scheme and loop characteristics of the asymmetric pump-controlled hydraulic system were simulated and analyzed respectively from the aspects of speed open-loop and closed-loop control schemes and load characteristics. The results show that an asymmetrical speed was formed in the speed open-loop control system, while the speed closed-loop control system exhibits a more stable state to achieve higher position control accuracy and a stable operation state which could obtain better position control performance. The closed-loop speed could keep stable state and is basically not affected by the load.

**Key words:** pump-controlled hydraulic system; loop characteristics; hydraulic cylinder flow; variable displacement; variable rotation speed

电液控制系统主要包括阀控系统与泵控系统两类, 广泛应用于液压机领域。其中, 阀控液压系统具备快速响应、可以实现位置的高精度控制等优势, 但也存在节流损失偏大、能量效率低的缺陷<sup>[1-4]</sup>。

不同于阀控系统的控制方式, 泵控系统不使用控制阀调节流程, 而是利用控制泵达到不同液压缸运动参数的调节效果, 采用这种控制方式可以显著地减少节流损耗, 因此, 泵控方式成为了一项高效节能的电液控制工艺<sup>[5-7]</sup>。泵控液压缸技术发展明显, 但目前还未完全消除因无杆腔和有杆腔端面差而引起的流量不对称问题。因此, 对于目前的闭式泵控系统而言, 急需克服液压缸流量不匹配的问题, 进一步提升液压系统的能量效率<sup>[8-9]</sup>。

收稿日期: 2021-03-16; 修订日期: 2021-06-15

基金项目: 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目 (2017-GGJS242)

作者简介: 王海燕 (1974-), 女, 学士, 高级讲师

E-mail: yuanhewei2021@163.com

葛磊等<sup>[10]</sup>对动臂运行过程进行了研究,选择液压蓄能器作为储能部件,同时,研究了泵控液压机动臂液压缸闭式回路控制系统,仿真结果显示系统实现了良好的运行状态,节能效率提升至33.2%。任好玲等<sup>[11]</sup>设计了一种闭式节能驱动系统,同时将其应用到动臂系统运动控制领域,该系统可以采用无阀控制模式,结果表明,这种动臂液压缸驱动结构能够获得明显的节能效果,节能效率达到56%。黄家海等<sup>[12]</sup>对定排量轴向柱塞泵进行了分析,在此基础上开发了一种通过斜盘摆角反馈的形式实现调控功能的PD调控方法,并对该方法的控制有效性进行了测试。赵斌等<sup>[13]</sup>开发了一种组合结构的三配流窗口变排量外啮合变量齿轮泵,同时优化了控制过程,之后设计了一种可实现位置调控功能的变滑块模式来完成齿轮泵的变量调控功能。

本文设计了一种通过变排量、变转速的控制方法,同时研究了系统的速度控制方案,为新系统构建了分析模型,完成新系统的位置、速度、负载的仿真测试。

## 1 非对称泵控液压系统控制设计

采用变排量、变转速方式进行控制时,转速呈现非线性的变化特征,而选择纯控制算法进行处理时,实际控制过程较复杂<sup>[14]</sup>。对于实际工作过程来说,工程机械部件在某些工作阶段需达到较快运行速度,例如在空载状态下进行返程,而在装载工况下则需满足较高的运行精度。为同时满足系统控制性能并达到所需工作状态,设计了一种以转速调节为主,同时辅助排量调节的控制方法。

图1为非对称泵控液压系统原理图。该系统的组成部分包含伺服电动机、数字控制器等。该系统通过伺服电动机驱动,可以获得很大的调节范围,变量泵类型通常选择斜盘型柱塞比例泵或斜盘型柱塞伺服泵,实现伺服电动机驱动。当伺服电动机接收到信号后实现对运动速度的调控,可以在两个自由度之间进行切换以获得特定的输出排量,达到对液压缸伸缩位置和运动速度的控制功能。

采用变排量、变转速泵控液压系统可以同时发挥定转速变排量泵控液压系统与定排量变转速泵控液压系统的优势,可以实现快速响应、实时控制的功能。此系统由电机与变量泵共同组成,同时系统间还可以进行协调控制,通过系统协同过程来提升系统动态调节效率。

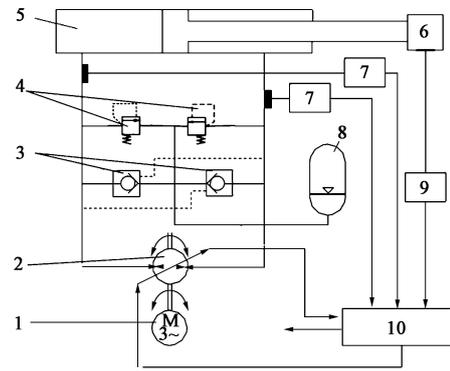


图1 非对称泵控液压系统原理图

1. 伺服电动机 2. 变量泵 3. 液控单向阀 4. 安全阀 5. 液压缸  
6. 负载 7. 压力传感器 8. 蓄能器 9. 位移传感器 10. 数字控制器

Fig. 1 Principle diagram of asymmetric pump-controlled hydraulic system

定转速变排量泵控液压系统是利用调节变量泵排量的方式来获得不同的动力源输出排量,具有较大的能量需求,并且需对变量泵进行变量机构调节,能够有效地满足转速控制难度较大的工程应用领域。定排量变转速泵控液压系统利用调节性能优异的伺服电动机转速的方式来获得不同的动力源输出排量,并完成对液压缸的实时调控,获得了更快的系统响应速度。

## 2 控制方案

### 2.1 速度开环控制方案

图2为非对称泵控液压系统速度开环控制流程图。根据设定速度信号,实现电动机控制功能,由电动机带动泵进行流量输出,从而实现对液压缸的控制,最终完成负载调控;当形成不同方向的负载时,由于存在液压缸面积差,流量产生不对称变化,可以对液压缸的控制腔进行判断,其中具备更高压力的腔体为控制腔<sup>[15]</sup>。非对称泵控液压系统能够完成不对称流量的自动匹配,因此,无需继续判断单出杆控制腔状态。



图2 非对称泵控液压系统速度开环控制流程图

Fig. 2 Flow chart of speed open-loop control for asymmetric pump-controlled hydraulic system

### 2.2 速度闭环控制方案

非对称泵控液压系统速度闭环控制流程图如图3所示。在速度开环控制下,系统容易受到外部因素的作用而发生波动。相对速度开环控制方案,速

度闭环控制方案可以通过反馈结构获取信号变化特征,从而大幅减小速度的波动性,能够同时完成速度与位移的准确控制。

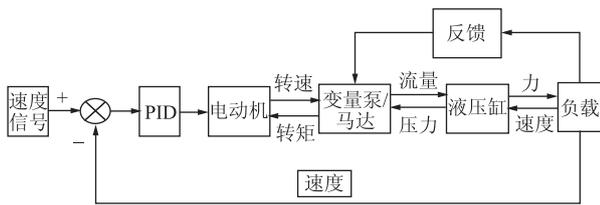


图 3 非对称泵控液压系统速度闭环控制流程图

Fig. 3 Flow chart of speed closed-loop control for asymmetric pump-controlled hydraulic system

对液压缸的负载信号进行反馈处理来调控变量泵/马达的转速,反馈公式按照式(1)进行:

$$e = \frac{q_A - q_B}{nV} \quad (1)$$

式中:  $e$  为反馈信号;  $q_A$  和  $q_B$  分别为有杆腔与无杆腔的流量;  $V$  为变量泵的排量;  $n$  为反馈调节系数。

液压缸的无杆腔、有杆腔的流量差值通过变量泵进行提供;通过调节变量泵排量的方式来弥补泄漏部分及其对油液造成压缩后的流量损失。

### 3 回路特性仿真分析

图 4 给出了本文构建的非对称泵控液压系统控制模型。图 4 中左半部分是电机驱动控制模型,右半部分是对应图 1 建立的非对称泵控液压系统仿真模型。

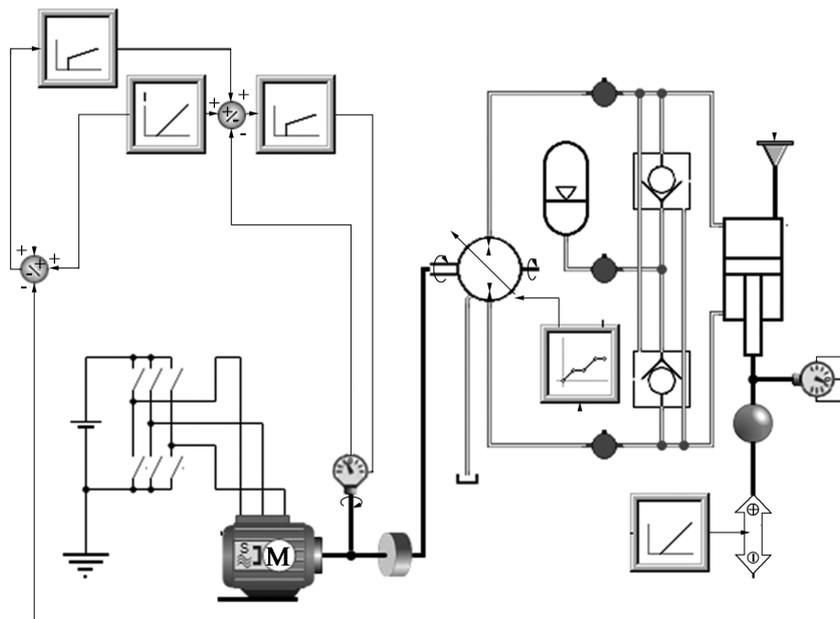


图 4 非对称泵控液压系统控制模型

Fig. 4 Control model of asymmetric pump-controlled hydraulic system

#### 3.1 速度开环控制回路特性分析

单泵控液压系统形成了不对称的速度。图 5 为非对称泵控液压系统形成的开环速度曲线。由图 5 可以发现:在时间逐渐增加的过程中,系统产生了抖动变化的速度。速度位于第 1 象限时均等于  $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 位于第 3 象限时也等于  $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 形成了速度大小对称分布的特征。

#### 3.2 速度闭环控制回路特性分析

图 6 为非对称泵控液压系统形成的闭环速度曲线,参照图 5 中的设置速度。通过分析可以发现:该系统获得了良好的速度跟随性;速度闭环与速度

开环控制系统相比存在一定的滞后性,但达到了更稳定的状态;速度开环控制系统发生了速度的明显波动,而速度闭环控制系统则表现出更稳定的状态。

#### 3.3 位置控制回路特性分析

图 7 为对非对称泵控单出杆缸速度开、闭环控制系统进行测试得到的位移曲线。可以明显地看到,相对于速度开环控制系统,速度闭环控制系统得到的位移更高,表现出更稳定的运行状态,能够对位置进行更准确的控制,由此获得了更优位置控制性能。

#### 3.4 系统负载特性分析

图 8 为负载特性曲线图,由图 8 可知,设置变

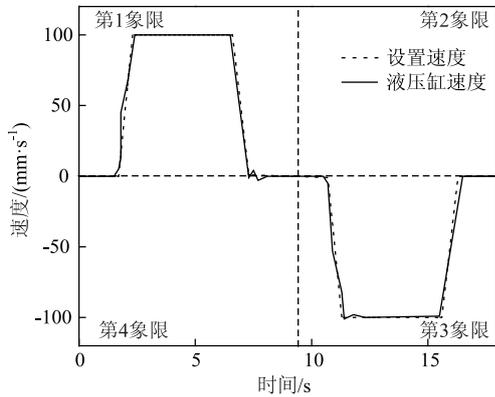


图 5 非对称泵控液压系统开环速度曲线  
Fig. 5 Velocity curves of open-loop for asymmetric pump-controlled hydraulic system

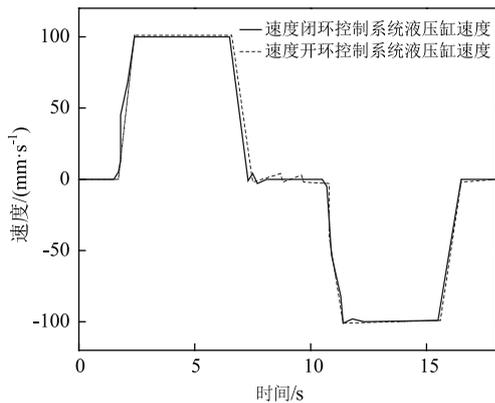


图 6 非对称泵控液压系统闭环速度曲线  
Fig. 6 Velocity curves of closed-loop for asymmetric pump-controlled system

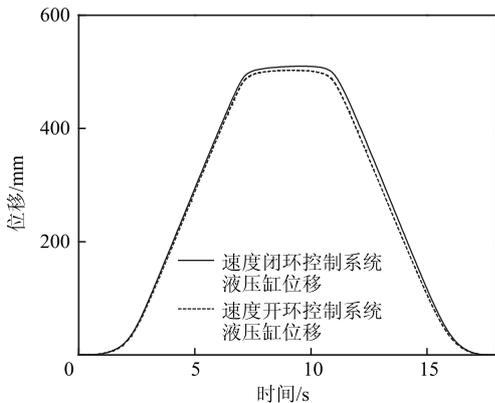


图 7 非对称泵控液压缸速度开、闭环控制系统位移曲线  
Fig. 7 Displacement curves of speed open-loop and closed-loop control systems for asymmetric pump-controlled hydraulic cylinder

负载之后，负载值在 2.5~3.0 s、5.0~5.5 s、9.0~9.5 s 之间发生了增大现象；同时在 12.0~12.5 s、13.5~14.0 s 之间发生了负载降低现象。其中，2.5~3.0 s、5.0~5.5 s、12.0~12.5 s、13.5~14.0 s 时间段内发

生了开环速度的大幅波动，而闭环速度则保持稳定状态，基本未受到干扰；在 9.0~9.5 s 阶段内，未出现开环和闭环速度变化，均保持在 0 的状态。

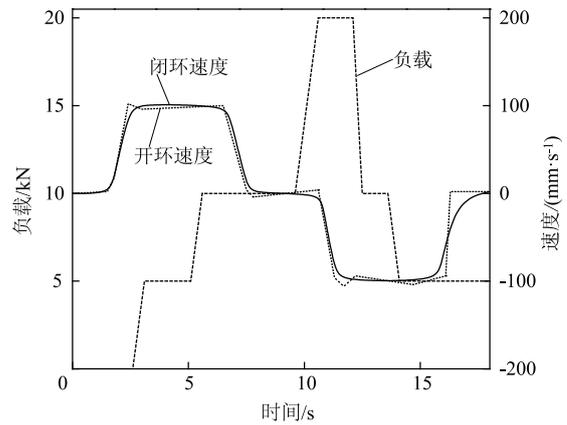


图 8 负载特性曲线  
Fig. 8 Curves of load characteristics

### 4 结语

速度开环控制回路系统形成了不对称的速度，速度闭环控制回路系统则表现出更稳定的状态。速度闭环控制回路系统可以达到更高的位置控制精度，达到平稳运行状态，获得更优位置控制性能；闭环速度保持稳定状态，基本不受负载的影响。

### 参考文献：

[1] 毛玺, 聂少武, 李阁强, 等. 直驱式电液伺服模锻锤控制系统 AMESim 仿真及控制研究 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (8): 141-149.  
Mao X, Nie S W, Li G Q, et al. Research on AMESim simulation and control for direct drive electro-hydraulic servo die forging hammer cont [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (8): 141-149.

[2] 鲁苗, 陈柏金, 柳龙, 等. 泵控锻造液压机控制系统研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (7): 140-145.  
Lu M, Chen B J, Liu L, et al. Research on control system of pump-controlled forging hydraulic press [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (7): 140-145.

[3] 贺娅莉, 谷雨, 刘伟, 等. 数控转台液伺服双马达系统改进 PSO 同步控制设计 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (6): 150-154.  
He Y L, Gu Y, Liu W, et al. Improved PSO synchronous control design on hydraulic servo double motor system with CNC turntable [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (6): 150-154.

[4] 郭玉玺, 张利. 大型模锻液压机的混合动力驱动系统 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (10): 124-129.  
Guo Y X, Zhang L. Hybrid power drive system of large die forging hydraulic press [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (10): 124-129.

- [5] 牛勇, 权晓惠, 张晋杰. 径向锻造油压机电液伺服控制系统建模与仿真 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (2): 144-152.  
Niu Y, Quan X H, Zhang Y J. Modeling and simulation on electro-hydraulic servo control system for radial forging hydraulic press [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (2): 144-152.
- [6] 王波, 郝云晓, 权龙, 等. 分腔独立变转速泵控电液伺服系统特性研究 [J]. 机械工程学报, 2020, 56 (18): 235-243.  
Wang B, Hao Y X, Quan L, et al. Research on characteristics of electro-hydraulic servo system by sub-chamber independent variable-speed [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56 (18): 235-243.
- [7] 郝云晓, 夏连鹏, 权龙, 等. 闭式泵控液气储能重载举升机构特性研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55 (16): 213-219.  
Hao Y X, Xia L P, Quan L, et al. Research on characteristics of heavy-load lifting machinery based on hydraulic-gas energy storage and closed displacement controlled system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55 (16): 213-219.
- [8] 张德, 谷立臣, 耿宝龙, 等. 非平稳工况下闭式泵控马达液压系统的稳定性分析 [J]. 机电工程, 2021, 38 (3): 300-305.  
Zhang D, Gu L C, Geng B L, et al. Stability analysis of closed loop pump control motor hydraulic system under non-stationary condition [J]. Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38 (3): 300-305.
- [9] 许文斌, 王建平. 负开口比例阀控液压系统非对称控制策略 [J]. 控制工程, 2017, 24 (9): 1844-1849.  
Xu W B, Wang J P. Asymmetric control strategy of negative proportional valve controlling hydraulic system [J]. Control Engineering of China, 2017, 24 (9): 1844-1849.
- [10] 葛磊, 张晓刚, 权龙, 等. 变转速非对称泵直驱液压挖掘机斗杆试验研究 [J]. 机械工程学报, 2017, 53 (16): 210-216.  
Ge L, Zhang X G, Quan L, et al. Experimental study on the characteristics of speed-variable asymmetric pump driven excavator arm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53 (16): 210-216.
- [11] 任好玲, 林添良, 缪骋. 常闭式高速开关阀设计与动态性能分析 [J]. 机械设计, 2017, 34 (9): 28-31.  
Ren H L, Lin T L, Miao C. Design and dynamic performance analysis of the normally-closed high speed on-off valve [J]. Journal of Machine Design, 2017, 34 (9): 28-31.
- [12] 黄家海, 贺伟, 郝惠敏, 等. 变排量非对称轴向柱塞泵控制特性分析 [J]. 农业机械学报, 2019, 50 (3): 368-376.  
Huang J H, He W, Hao H M, et al. Analysis of control characteristics of variable-displacement asymmetric axial piston pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50 (3): 368-376.
- [13] 赵斌, 何焱冰, 郭伟伟, 等. 新型变排量外啮合齿轮泵流量特性研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55 (24): 227-235.  
Zhao B, He Y Y, Guo W W, et al. Study on flow characteristics of new variable displacement external meshing gear pump [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55 (24): 227-235.
- [14] 马艳斌, 赵斌, 郝云晓. 非对称泵控单出杆液压缸系统特性分析 [J]. 液压与气动, 2020, (8): 167-175.  
Ma Y B, Zhao B, Hao Y X. Characteristics analysis of asymmetric pump-controlled single-rod hydraulic cylinder system [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, (8): 167-175.
- [15] 王翔宇, 张红娟, 杨敬, 等. 非对称泵控装载机动臂特性研究 [J]. 机械工程学报, 2021, 57 (12): 258-266, 284.  
Wang X Y, Zhang H J, Yang J, et al. Research on the characteristics of wheel loader boom driven by the asymmetric pump controlled system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57 (12): 258-266, 284.
- 
- (上接第 161 页)
- [9] 程相, 郑恣, 左哲清, 等. 滑阀中位线性补偿技术研究 [J]. 液压与气动, 2020, (6): 141-145.  
Cheng X, Zheng Q, Zuo Z Q, et al. Technology of linear compensation for the middle position of slide valve [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, (6): 141-145.
- [10] Li H, Huang Y, Zhu G M, et al. Adaptive LQT valve timing control for an electro-hydraulic variable valve actuator [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 27 (5): 2182-2194.
- [11] Huang J H, Wang X N, Wang H, et al. Development of a flow control valve with digital flow compensator [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2019, 66 (7): 157-169.
- [12] 王立新, 赵丁选, 刘福才, 等. 电液比例伺服力加载自抗扰控制 [J]. 机械工程学报, 2020, 56 (18): 216-225.  
Wang L X, Zhao D X, Liu F C, et al. Active disturbance rejection control for electro-hydraulic proportional servo force loading [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56 (18): 216-225.
- [13] 毛玺, 聂少武, 李阁强, 等. 直驱式电液伺服模锻锤控制系统 AMESim 仿真及控制研究 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (8): 141-149.  
Mao X, Nie S W, Li G Q, et al. Research on AMESim simulation and control for direct drive electro-hydraulic servo die forging hammer control system [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (8): 141-149.
- [14] 陈革新, 赵鹏辉, 刘小胜, 等. 电液伺服闭式泵控系统位置前馈补偿控制研究 [J]. 液压与气动, 2019, (12): 28-32.  
Chen G X, Zhao P H, Liu X S, et al. Position feedforward compensation control of electro-hydraulic servo closed pump control system [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019, (12): 28-32.
- [15] 刘胜斐, 孙青林, 陈增强, 等. 比例阀控电液系统抗扰换向滞后补偿反步控制 [J]. 控制理论与应用, 2020, 37 (7): 1521-1534.  
Liu S F, Sun Q L, Chen Z Q, et al. Switch delay compensation and disturbance rejection control for proportional valve controlled electro-hydraulic system with backstepping method [J]. Control Theory & Applications, 2020, 37 (7): 1521-1534.