

# 液压机节流自控负载敏感液压系统及其 Simulink 仿真

李坤宏<sup>1</sup>, 江桂云<sup>2</sup>, 朱代兵<sup>3</sup>

(1. 重庆工业职业技术学院 机械工程与自动化学院, 重庆 401120; 2. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400030;  
3. 重庆红江机械有限责任公司, 重庆 402162)

**摘要:** 为克服液压机阀控系统运行能效低的问题, 采用进出口技术和负载敏感技术相结合的方法来调节阀控系统, 并对进出口油口联动节流进行了适当调整。通过 AMESim 构建得到仿真模型, 探讨了节流自控负载敏感系统运行控制过程。研究结果表明: 与负载敏感系统相比, 采用进出口自控系统能够实现节流口解调, 阻抗条件下该系统能够对出油腔低压力状态进行自动调节, 有效降低出油口的压力损耗。进入 0.2~0.4 s 的超越缩回工况后, 右腔压力和泵输出压力均为 1 MPa 的稳定值; 在 0.4~0.6 s 之间时, 系统从超越缩回工况过渡至阻抗工况。为负载敏感系统设置节流自控后可以显著增大电机的输出功率, 使液压系统达到更高的工作效率。

**关键词:** 负载敏感系统; 进出口自控; 液压系统; 节流; 压力损耗

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.03.028

**中图分类号:** TH137      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 03-0169-05

## Throttling automatic control load sensing hydraulic system of hydraulic press and its Simulink simulation

Li Kunhong<sup>1</sup>, Jiang Guiyun<sup>2</sup>, Zhu Daibing<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 401120, China;  
2. School of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;  
3. Chongqing Hongjiang Machinery Co., Ltd., Chongqing 402162, China)

**Abstract:** In order to overcome the problem of low energy efficiency for valve control system of hydraulic press, the valve control system was regulated by the method of inlet-outlet technology combining with load sensing technology, and the linkage throttling for the inlet-outlet of oil was adjusted appropriately. Then, the simulation model was built by AMESim, and the operation control process of throttling automatic control load sensing system was discussed. The results show that compared with load sensing system, the inlet-outlet automatic control system can realize the throttle demodulation, and the system can automatically adjust the low pressure state for the outlet chamber of oil under the impedance condition, effectively reducing the pressure loss for the outlet of oil. After entering the over-retracting condition of 0.2~0.4 s, the pressure of right chamber and the output pressure of pump are both stable values of 1 MPa. Between 0.4~0.6 s, the system transitions from over-retracting condition to impedance condition. After setting the throttling automatic control for the load sensing system, the output power of motor can be significantly improved, so that the hydraulic system can achieve higher work efficiency.

**Key words:** load sensing system; inlet-outlet automatic control; hydraulic system; throttling; pressure loss

阀控系统具备很高的控制精度, 这使其成为模锻液压机的重要控制结构。同时, 考虑到泵源压力和流程都处于恒定状态, 设计该控制系统时需能够适应最大负载工况<sup>[1-2]</sup>。处于较小负载条件下时,

泵源的实际输出功率远高于负载, 从而显著提高了节流和溢流过程的能量损耗<sup>[3-4]</sup>。对进出口进行自动控制的过程是通过设置不同的控制阀来对液压缸的进油口和出油口进行调控, 能够克服进出油口之间发生联动节流的问题<sup>[5]</sup>。按照以上方式能够大幅提升系统的控制自由度, 从而在适应系统控制要求的条件下进一步提升能效<sup>[6-7]</sup>。

机液负载敏感系统通常选择长管道来完成压力反馈过程, 无法实现系统的稳定运行。为克服上述缺陷, 有学者设计了一种更加高效的电液负载敏感

收稿日期: 2021-01-27; 修订日期: 2021-04-28

基金项目: 重庆市科技计划(应用开发重大)项目  
(cstc2015yykfC40001)

作者简介: 李坤宏(1975-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: likunhong777@163.com

系统,其具体的控制方式为压力反馈的形式,以压力传感器代替原有的梭阀网络,从而生成最大压力信号,同时加入了电子泵的控制方式<sup>[8-9]</sup>。为了控制负载敏感系统保持平稳运行状态,Zahe B<sup>[10]</sup>引入了一种可以高效匹配电液流量的控制系统,取消了原先以压力参数进行反馈调节的结构,再利用阀开口度的调节过程计算得到执行器流量,以电机转速与泵排量相结合的方式计算出电控泵数据,之后控制电控泵和伺服阀的运行过程。汪成文等<sup>[11]</sup>设计了一种以进出口独立控制技术实现的负载敏感系统,同时构建了相应的数学模型,引入自抗扰控制方法,对自由度耦合问题进行了控制仿真分析,结果显示,该自抗扰控制器能够解决系统中的耦合问题。袁士豪等<sup>[12]</sup>根据负载敏感定量泵液压回路压力差异以及主控多路阀阀芯位移参数,对定量泵出口压力、补偿阀开口度、负载压力、主控阀芯位移的关联性开展了研究,在逐渐提高定量泵出口压力的过程中,负载压力发生了小幅波动,而补偿阀芯则表现为运动幅度逐渐降低。

针对阀控系统能效低的问题,本文采用进出口技术和负载敏感技术相结合的方法来调节日控系统,并对进油口联动节流进行了适当调整。最后通过AMESim软件系统建立了数学模型,在此基础上分析了本文设计的系统控制过程。

## 1 节流自控负载敏感系统

### 1.1 系统原理

节流自控负载敏感系统按照图1所示方式工作,系统组成包括进出口自控结构和泵控子系统。采用进出口自控子系统进行控制时,可以根据不同部分的功能差异来调节伺服阀阀芯位移,从而完成液压缸位置压力的高效控制,使系统能耗大幅降低,并达到更稳定的系统运行状态<sup>[13]</sup>。

### 1.2 数学模型

在负载敏感系统中设置了伺服阀,可以完成进出口节流口解耦计算。假设伺服阀比液压缸具备更高的工作频率,则对伺服阀以动态方式进行简化,建立以下比例表达式<sup>[14]</sup>。

$$x_v = ku \quad (1)$$

式中: $x_v$ 为伺服阀阀芯位移; $u$ 为伺服阀流速参数; $k$ 为伺服阀增益比例。

设置以下函数计算式:

$$s(*) = \begin{cases} 1, & * \geq 0 \\ 0, & * < 0 \end{cases}, \quad \text{令 } \alpha = C_d \omega \sqrt{2/\rho} \quad (2)$$

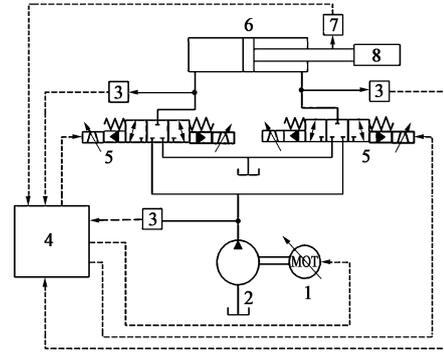


图1 节流自控负载敏感系统原理图

1. 伺服电机 2. 定量泵 3. 压力传感器 4. 控制器 5. 伺服阀  
6. 液压缸 7. 位置传感器 8. 负载

Fig. 1 Principle diagram of throttling automatic control load sensing system

式中: $s(*)$ 为符号定义公式; $\alpha$ 为伺服阀阻尼系数; $\omega$ 为伺服阀面积梯度; $C_d$ 为伺服阀流量系数; $\rho$ 为液压油密度。

伺服阀1、2的流量计算式如下:

$$\begin{cases} Q_1 = \alpha_1 k_1 u_1 [s(u_1)(\sqrt{p_s - p_1}) + s(-u_1)(\sqrt{p_1 - p_r})] \\ Q_2 = \alpha_2 k_2 u_2 [s(u_2)(\sqrt{p_2 - p_r}) + s(-u_2)(\sqrt{p_s - p_2})] \end{cases} \quad (3)$$

式中: $Q_1$ 和 $Q_2$ 分别为伺服阀1和2的输出流量; $p_1$ 和 $p_2$ 分别为伺服阀1和2的压力; $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 分别为伺服阀1和2的阻尼系数; $k_1$ 和 $k_2$ 分别为伺服阀1和2的电流增益比例; $u_1$ 和 $u_2$ 分别为伺服阀1和2的阀芯位移增益比例; $p_s$ 和 $p_r$ 分别为泵输出压力与回油压力。

图2显示了进出口独立调节负载敏感系统的控制结构,其中, $Q_{in}$ 为流入液压缸的流量, $Q_{cp}$ 为泵泄漏的流量, $u_p$ 为伺服电机的控制信号, $D_p$ 和 $V_p$ 分别为定量泵的排量和容积, $m$ 为负载质量, $x_p$ 为活塞位置, $A_p$ 为液压缸有效作用面积, $B$ 为黏性阻尼系数, $V_1$ 和 $V_2$ 分别为液压缸两腔及连接管道容积, $F_L$ 为负载信号。根据图2可知,进出口独立调节负载敏感系统属于一类强耦合形式的多输入多输出系统。泵输出压力与液压缸流量之间具有明显的耦合关系,已根据负载敏感系统开展了深入分析。同时可以发现,泵两腔压力与活塞速度之间也具有明显的耦合性,具体表现在通过阀芯位移调控液压缸一腔压力的过程中,当活塞速度改变时会对压力控制过程造成影响。

### 1.3 阻抗控制

在阻抗伸出的过程中,液压缸的左腔与右腔分

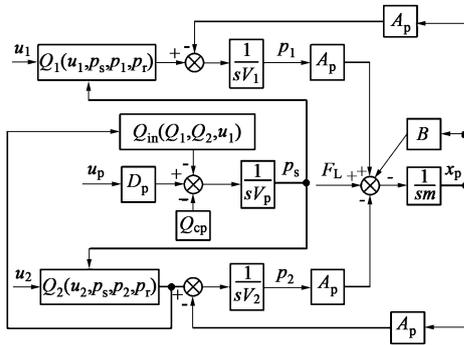


图2 系统控制框图

Fig. 2 System control block diagram

别处于进油与回油状态。此时，伺服阀1处于左位，调控液压缸的位置；伺服阀2处于右位，调控右腔压力；利用伺服电机控制泵的转速，使泵出口压力相对左腔压力高出1个固定的差值。图3显示了阻抗伸出状态下的控制原理。

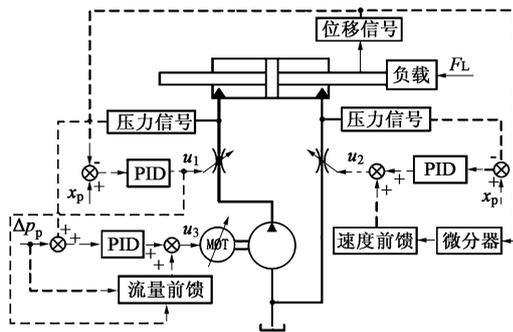


图3 阻抗伸出状态下系统控制原理框图

Fig. 3 Control principle block diagram of system in impedance extended state

根据闭环压力反馈结果，设置了流量前馈的方式补偿阀口流量引起的泵出口压力变化。根据计算式(4)，并利用泵出口压差指令与伺服阀1的流量信号进行计算，得到伺服电机的控制律：

$$u_3 = k_p e(t) + \int_{t_0}^t k_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{\alpha_1 k_1 u_1 \sqrt{\Delta p_p}}{D_p k_p} \quad (4)$$

式中： $u_3$ 为电机输入信号； $e(t)$ 为泵出口压力误差； $\Delta p_p$ 为泵出口压差指令信号； $k_p$ 为电机的转速增益； $k_d$ 为PID控制微分项增益； $t$ 为信号输出时间； $t_0$ 和 $t_1$ 分别为信号获取的起止和终止时间

## 2 系统仿真分析

### 2.1 仿真模型

通过分析系统控制机制，再以 AMESim 软件融合各数据库中的参数来建立仿真模型，最后采用

Simulink 进行系统参数调控<sup>[15]</sup>，结果见图4，其中 MUX 为数据选择器。该仿真模型由3输入与3输出组成，输入部分为电机调控信号以及2个伺服阀，输出部分包括泵源压力、液压缸两腔、活塞位移参数。表1为节流自控负载敏感系统建立的仿真模型的参数。

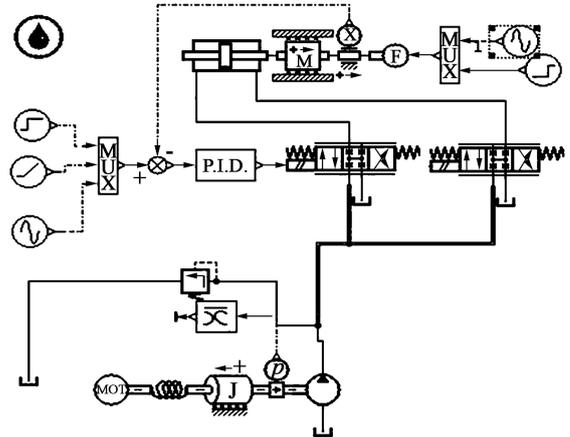


图4 节流自控负载敏感系统仿真模型

Fig. 4 Simulation model of throttling automatic control load sensing system

表1 仿真模型参数

Table 1 Parameters of simulation model

| 参数   | 数值  |
|--|-----|
| 液压缸行程/m                                      | 0.5 |
| 液压缸内径/mm                                     | Φ42 |
| 活塞直径/mm                                      | Φ30 |
| 粘性阻尼/(N·(m·s <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup> ) | 460 |
| 伺服阀1额定压力/MPa                                 | 32  |
| 伺服阀1额定流量/(L·min <sup>-1</sup> )              | 40  |
| 伺服阀1额定电流/mA                                  | 50  |
| 伺服阀2额定压力/MPa                                 | 32  |
| 伺服阀2额定流量/(L·min <sup>-1</sup> )              | 40  |
| 伺服阀2额定电流/mA                                  | 50  |
| 定量泵排量/(mL·r <sup>-1</sup> )                  | 22  |
| 电机转动惯量/(kg·cm <sup>2</sup> )                 | 12  |
| 油液体积弹性模量/MPa                                 | 720 |
| 油液密度/(kg·m <sup>-3</sup> )                   | 900 |

### 2.2 仿真结果分析

#### 2.2.1 阻抗工况

设定位置指令为0.05t的斜坡信号，压差指令为2MPa。图5为阻抗工况下节流自控负载敏感系统的压力曲线。根据图5可以发现，在0.0~0.4s时间内，活塞没有受到外力的限制，系统右腔压力为1MPa，泵输出压力为4.1MPa。左腔压力相对

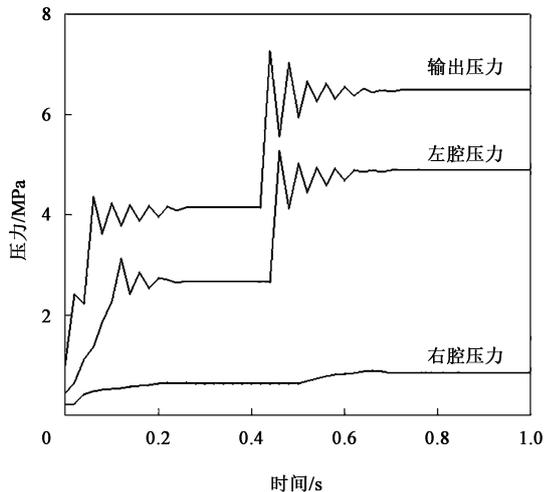


图 5 阻抗工况下节流自控负载敏感系统的压力曲线

Fig. 5 Pressure curves of throttling automatic control load sensing system under impedance condition

右腔压力更大,这是因为:在无外力条件下,活塞在运动过程同样需要克服粘性和滑动摩擦力。处于 0.4~1.0 s 之间时,设置 1000 N 的外力作为活塞阻力,右腔经过初期短暂波动后获得了 1 MPa 的稳定压力,同时左腔压力也上升至 4.7 MPa,泵达到了 6.1 MPa 的输出压力,左节流口与右节流口的压降分别为 2.5 与 1.0 MPa。

通过上述仿真结果的分析可以发现,实际仿真数据获得了与理论压力分析过程相近的结果。与负载敏感系统相比,采用进出口自控系统能够实现节流口解调,阻抗条件下该系统能够对出油腔低压力状态进行自动调节,有效降低出油口的压力损耗。

### 2.2.2 复合工况

为研究工况切换的有效性,把位置指令设置为正弦曲线的形式,同时模拟测试了液压缸推动负载的垂直升降过程,将向上方向与向下方向分别以正、负进行表示。控制压力指令为 1 MPa,压差指令为 4 MPa。负载随时间逐渐提高,在阻抗伸出工况下,液压缸的向上运动受到重力的阻碍作用。负载降低后,重力可以为液压缸的向下运动过程提供协助,是一种超越缩回工况。

图 6 为在复合工况下得到的压力测试数据。可以看到:介于 0.0~0.2 s 范围内进入阻抗伸出状态,右腔达到 1 MPa 的固定压力,输出端相对进油腔压力上升 4.2 MPa;介于 0.2~0.4 s 时间段内,进入超越缩回状态,此时右腔与泵输出压力均

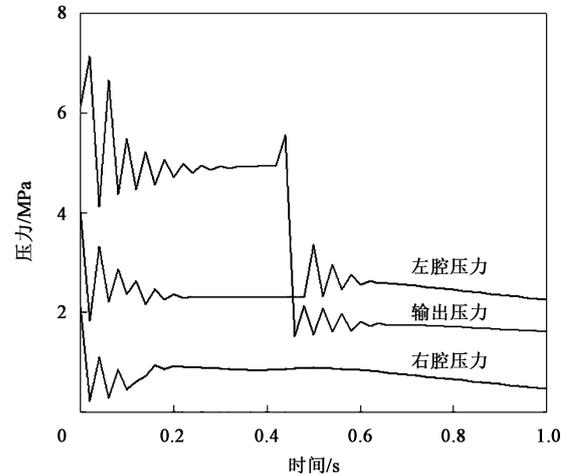


图 6 复合工况下节流自控负载敏感系统的压力曲线

Fig. 6 Pressure curves of throttling automatic control load sensing system under compound working condition

达到 1 MPa,介于 0.4~0.6 s 范围内,由超越缩回工况过渡至阻抗工况。可以明显看到,压力在切换期间发生了明显波动,之后进入一个相对稳定的运行状态。

### 2.2.3 系统能效

对比了节流自控系统和负载敏感系统的运行能效,利用正弦曲线显示位置指令的变化过程,再将压力设定为 1 MPa,压差为 2 MPa,以相同参数测试系统运行的控制性能。图 7 给出了有节流自控和无节流自控状态下的泵输出功率的变化结果。由图 7 可以发现,没有设置节流自控的系统在每种工况下都相对节流自控模式获得了更低的泵输出功率。对上述测试结果进行分析后得到,在系统控制模式

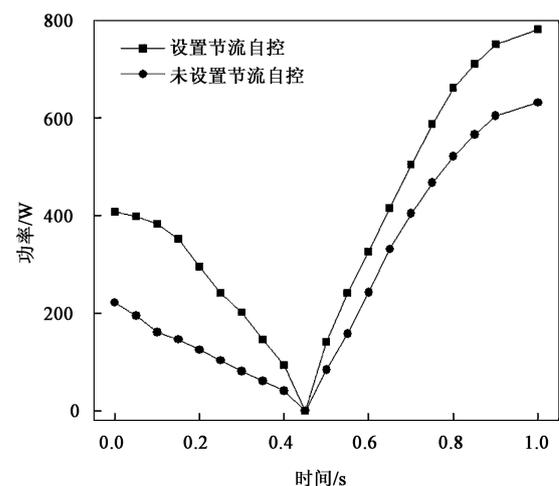


图 7 负载敏感系统泵输出功率

Fig. 7 Output powers of pump for load sensing system

中加入节流自控可以使电机获得更高的输出功率, 显著提升了系统的运行效率。

### 3 结论

(1) 用进出口节流自控系统能够实现节流口解调, 阻抗条件下该系统能够对出油腔低压力状态进行自动调节, 有效降低了出油口的压力损耗。

(2) 负载降低后, 重力为液压缸的向下运动过程提供协助, 是一种超越缩回工况。在 0.4 ~ 0.6 s 之间时, 系统从超越缩回工况过渡至阻抗工况。

(3) 为负载敏感系统设置节流自控后, 可以显著增大电机的输出功率, 使液压系统达到更高的工作效率。

#### 参考文献:

- [1] 邵璇, 张永德, 孙桂涛, 等. 液压机器人关节力补偿控制研究 [J]. 电机与控制学报, 2018, 22 (9): 98-103.  
Shao X, Zhang Y D, Sun G T, et al. Hydraulic robot joint force compensation control [J]. Electric Machines and Control, 2018, 22 (9): 98-103.
- [2] 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.
- [3] 柏艳红, 权龙, 郝小星, 等. 基于流量近似的阀控液压缸动力机构建模 [J]. 机械工程学报, 2014, 50 (24): 179-185.  
Bai Y H, Quan L, Hao X X, et al. Modeling of hydraulic valve-controlled cylinder power mechanism based on flow approximation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50 (24): 179-185.
- [4] 贺继林, 危丹锋, 冯利花, 等. 挖掘机双阀芯液压系统的控制策略分析 [J]. 机械设计与研究, 2011, 27 (3): 98-102.  
He J L, Wei D F, Feng L H, et al. Control strategy of excavator hydraulic system with twin spool valve [J]. Machine Design & Research, 2011, 27 (3): 98-102.
- [5] 丁孺琦, 徐兵, 张军辉. 负载口独立控制系统压力速度复合控制的耦合特性 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2017, 51 (6): 1126-1134.  
Ding R Q, Xu B, Zhang J H. Coupling property of pressure and velocity compound control in individual metering systems [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2017, 51 (6): 1126-1134.
- [6] Chen G R, Wang J Z, Wang S K, et al. The separate meter in separate meter out control system using dual servo valves based on indirect adaptive robust dynamic surface control [J]. Journal of Systems Science & Complexity, 2019, 32 (2): 109-128.
- [7] 董致新, 黄伟男, 葛磊, 等. 泵阀复合进出口独立控制液压挖掘机特性研究 [J]. 机械工程学报, 2016, 52 (12): 173-180.  
Dong Z X, Huang W N, Ge L, et al. Research on the performance of hydraulic excavator with pump and valve combined separate meter in and meter out circuits [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (12): 173-180.
- [8] 李昭, 谷立臣, 马玉. 变转速液动力源的负载前馈-反馈复合补偿控制 [J]. 中国机械工程, 2016, 27 (6): 805-809, 832.  
Li Z, Gu L C, Ma Y. Load feedforward and feedback compounded compensation control for variable speed hydraulic power supply [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27 (6): 805-809, 832.
- [9] 周蓉, 韩文杰, 谭文. 线性自抗扰控制的适用性及整定 [J]. 控制理论与应用, 2018, 35 (11): 1654-1662.  
Zhou R, Han W J, Tan W. On applicability and tuning of linear active disturbance rejection control [J]. Control Theory & Applications, 2018, 35 (11): 1654-1662.
- [10] Zahe B. Energiesparende Scveranderlichem Hydraulischer Antriebe Mit Versorgungsdruck Haltungen Und Ihre Regelung [D]. Aachen: RWTH Aachen University, 1993.
- [11] 汪成文, 刘华, 李标兵. 自抗扰控制进出口独立调节系统性能研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42 (11): 1679-1687.  
Wang C W, Liu H, Li B B. Study of the performance of an independent inlet and outlet adjustment system with active disturbance rejection control [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42 (11): 1679-1687.
- [12] 袁士豪, 殷晨波, 刘世豪. 机械负载敏感定量泵系统性能分析 [J]. 农业工程学报, 2013, 29 (13): 38-45.  
Yuan S H, Yin C B, Liu S H. Performance analysis of machinery load sensitive quantitative pump system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (13): 38-45.
- [13] 张鹏, 郭志军. 节流独立控制负载敏感液压系统特性及其仿真分析 [J]. 液压与气动, 2021, 45 (4): 82-86.  
Zhang P, Guo Z J. Characteristics and simulation analysis of load sensitive hydraulic system with independent throttle control [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2021, 45 (4): 82-86.
- [14] Herbst G. A simulative study on active disturbance rejection control (ADRC) as a control tool for practitioners [J]. Electronics, 2013, 2 (3): 246-255.
- [15] 闫小春, 李立青, 张强. 基于 Simulink 的建筑孔板液压成形机双蓄能器泵控冲压系统仿真分析 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (6): 155-159.  
Yan X C, Li L Q, Zhang Q. Simulation analysis on double accumulators pump-controlled stamping system in hydroforming machine for building orifice plate based on Simulink [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (6): 155-159.