

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.047

液压系统回油路压力双闭环模糊控制方法

张薇¹, 吕子兵²

(1. 广州市城市建设职业学校 建环系, 广东 广州 510000;

2. 亚龙智能装备集团股份有限公司 技术中心, 浙江 温州 325105)

摘要: 针对液压系统负载变化导致回油路压力瞬间下降, 进而引发系统振荡的问题, 提出考虑压力损失的液压回油路压力内外双环控制方法, 通过计算回油路压力总损失确定所需压力设定值, 并采用内外双环控制策略。实验结果表明: 该方法能将压力偏差控制在 0.01~0.02 MPa 范围内, 从而提升系统对负载突变的适应能力, 改善压力响应速度和稳定性。

关键词: 液压系统; 回油路压力; 双闭环; 模糊控制; 动力模型

中图分类号: TH137 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)02-0248-06

Double Closed-loop Fuzzy Control Method for Hydraulic System Return Oil Pressure

ZHANG Wei¹, LV Zibing²

(1. Department of Construction and Environment, Guangzhou Urban Construction Vocational School, Guangzhou 510000, China;

2. Technology Center, Yalong Intelligent Equipment Group Co., Ltd., Wenzhou 325105, China)

Abstract: To solve the problem of hydraulic system oscillation triggered by load change of the system due to an instantaneous decrease in the pressure of the return oil circuit, this article proposes a dual loop control method for hydraulic return circuit pressure considering pressure loss. The required pressure setting value is determined by calculating the total loss of return oil pressure, and internal and external dual loop control strategy is adopted. The experimental results show that the proposed method can control the pressure deviation within the range of 0.01–0.02 MPa, which improves the system's adaptability to sudden load changes, and enhances the pressure response speed and stability.

Keywords: hydraulic system; returning oil pressure; double closed loop; fuzzy control; dynamic model

0 引言

液压系统是工程机械和航空航天领域的关键部件,其稳定运行关乎设备可靠性与安全性。回油路是指液压油完成能量传递或执行动作后,从执行元件流回油箱或油源的管路及相关组件所构成的通路,它是液压系统闭环回路的重要组成部分^[1]。合理调控回油路压力可提升系统效率,降低能耗,减少元件磨损,从而延长设备使用寿命^[2-3]。实际工况下,液压系统负载复杂多变,外部负载突变、系统参数波动会使回油路压力大幅波动,引发振动、噪声等问题,严重时甚至导致系统失稳、影响设备运行、引发安全事故。为有效应对回油路压力控制的难题,众多学者展开了深入的研究。

朱叶艇等^[4]以目标总推力矢量为前提设计压

力闭环控制技术,采用全油缸自由分区推进和缺失顶力自补偿推进的推力控制模式完成压力控制,并通过模型试验验证了其技术可靠性。但是该推力控制模式在感知负载变化并响应时存在延迟,负载突变时回油路压力难以迅速跟随设定值,而产生较大压力偏差。张越等^[5]分析经典超螺旋滑模算法后提出改进压力控制策略,并用李雅普诺夫方程理论证明其稳定性。但面对复杂负载突变,改进算法的收敛速度和稳定性可能仍无法满足实际运行要求。王天翔等^[6]基于电动增压器方程创建离散预测控制模型和观测器,以实现柴油机进气压力控制,但在液压系统复杂非线性因素影响下,模型和观测器难以准确预测与控制系统状态,回油路压力在外部负载突变或系统参数波动时难以稳定。WANG 等^[7]建立蓄能器压力变化扰动模型,利用系统压力反馈设计扩展状态观

基金项目: 广东省课改课题《液压与气动系统控制与装调》课程建设项目 (GDZZJG202041)

第一作者简介: 张薇 (1968—), 女, 河北石家庄人, 副教授, 本科, 研究方向为机电技术, dsf2151hjg@163.com。

测器以提高压力控制鲁棒性,但该扰动模型可能无法精确描述复杂负载突变,影响压力补偿项准确建立和压力控制精度。

为提升液压系统回油路压力控制性能,本文提出回油路压力双闭环模糊控制方法。先建立包含节流孔压降等因素的总压力损失数学模型,再采用外环 PI 控制与内环二型模糊控制结合的双闭环结构,外环快速收敛压力偏差,内环动态调节增益,实现粗细调协同优化,增强系统对负载突变的适应能力,改善压力响应速度与稳定性,为液压系统高效可靠运行提供新方案。

1 液压系统回油路压力总损失计算

在液压系统回油路压力双闭环模糊控制过程中,油液流动需经过多个部件与路径,且元件(如阀门、管道等)具有非线性特性,油液在流动时会遭遇各种阻碍,例如 T 阀节流口的阻碍作用,进而产生压力损失。通过计算回油路压力总损失,能够全面掌握系统压力在回油路中的变化情况,为后续控制提供准确依据^[8-9]。

液压系统回油路中,假设油源以恒定流量供应^[10],当外部负载导致压力 D_a 高于某一特定值 D_b 时,左腔压力 P_a 会大于右腔压力 P_b 。在左右腔压力、稳态液动力的共同作用下, a 节流孔面积增大,而 b 节流孔面积会发生相应变化。最终,阀芯会在新位置达到平衡,其力平衡解析式为

$$\frac{\pi E^2}{4}(P_1 - P_2) - F_a + F_b = n \frac{d^2 x}{dt^2} + G \frac{dx}{dt} + 2Bx \quad (1)$$

式中: P_1 、 P_2 依次为阀芯左、右腔压力; B 为修正系数; x 为阀芯位移值; E 为阀芯直径; F_a 、 F_b 均为节流孔稳态液动力; n 为阀芯和弹簧的总质量; G 为阀芯阻尼; $\frac{d^2 x}{dt^2}$ 为阀芯加速度; $\frac{dx}{dt}$ 为阀芯运动速度。

以式(2)的阀门流量连续性方程为前提,可将液压系统回油路阀门固定节流孔流量为式(3)。

$$L = Q_m + \frac{V}{\gamma} \frac{dp}{dt} \quad (2)$$

$$Q = BC \sqrt{P - P_1 - P_2} \quad (3)$$

式中: V 为回油路进口腔容积; γ 为油液体积弹性模量; $\frac{dp}{dt}$ 为油液流量对时间的变化率; C 为固定节流孔大小; P 为入口压力; Q 为阀门固定节流孔流量。

由于阀门节流口具有特殊结构^[11],油液在阀门节流口处产生的压降更为显著。阀门节流口处

的压降为

$$\Delta p_k = \frac{\rho \left(\frac{r}{A_d \pi H \sin \eta x} \right)^2}{2} \quad (4)$$

式中: ρ 为油液密度; A_d 为阀门流量系数^[12-13]; η 为阀芯半锥角; H 为流口位置等效直径; r 为油液入口流量。

已知各管路面积时,流量会依据面积大小进行相应分配^[14-15],此时回油路对应流速为

$$v_f = \frac{r}{\frac{\pi}{4} H^2} \quad (5)$$

设定回油路沿程阻力系数为 τ ,则回油路沿程压力损失为

$$\Delta p_l = \tau \frac{L \rho v_f}{D 2} \quad (6)$$

式中 L 为回油路管道直径。

综上,将液压系统回油路压力总损失表示为

$$\Delta p = \Delta p_k + \Delta p_l \quad (7)$$

在压力控制回路中,根据计算得到的压力损失值,实时调整控制信号,使回油路压力能够稳定在设定值附近,进而提高系统的控制精度。压力控制原理如图 1 所示。

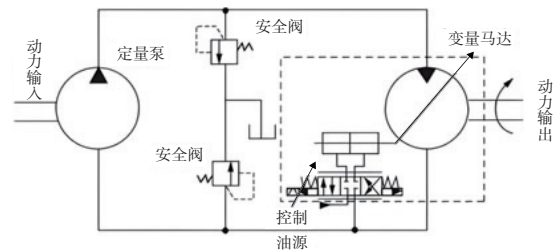


图 1 压力控制原理

2 液压系统回油路压力双闭环模糊控制

明确阀门流量、回油路压力的内在机制后,设计一种液压系统回油路压力双闭环模糊控制方法。双闭环结构能对压力的微小变化作出快速响应。当系统受到外部干扰,如负载突然变化时,外环根据设定压力目标值与实际压力值的偏差进行粗调,内环根据压力变化速率等因素进行细调,提高控制精度^[16-18]。液压系统回油路压力双闭环模糊控制流程图如图 2 所示。

2.1 液压系统回油路压力外环控制

在液压系统回油路压力双闭环模糊控制过程中,完成回油路压力总损失计算后,虽然了解了系

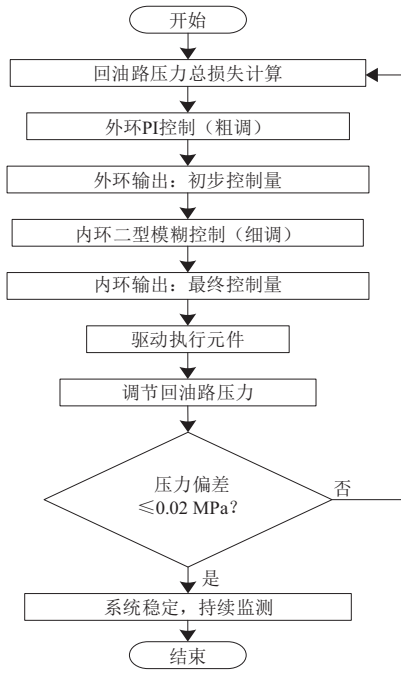


图2 压力双闭环模糊控制流程图

统压力在回油路中的变化情况,但仅依靠总损失计算无法直接对系统压力进行精确控制。系统在实际运行中会受到各种干扰和不确定因素的影响,导致回油路压力偏离设定值。为了实现对回油路压力的稳定控制,需要构建外环控制模型,通过外环控制来调节系统,使回油路压力能够跟踪设定值。

基于此目标,对液压系统回油路压力信号进行限幅处理,并以外环控制为目标,将阀门固定节流孔的流量 Q 、回油路压力的总损失 Δp 作为输入参数,以此构建外环控制模型。为更精准地描述液压系统中压力变换器的动态特性,将其等效为一个比例积分问题^[19-20]。基于该等效处理,设计外环控制器 $O_u(t)$,其表达式记作:

$$O_u(t) = Q \times K_{p1} b_{v1}(t) + \frac{K_{p2} \int b_{v1}(t) dt}{\Delta p} \quad (8)$$

$$b_{v1}(t) = V_b(t) - V_k(t) \quad (9)$$

式中: $b_{v1}(t)$ 为电压偏差; $V_b(t)$ 为预期液压系统电压; $V_k(t)$ 为真实反馈电压; K_{p1} 、 K_{p2} 分别为回油路外环电压控制的比例参数、积分参数。

设定当前液压系统压力偏差信号为 V_g ,结合上述外环控制模型及相关参数,可得到外环压力偏差粗配准解析式为

$$P_r(t) = \frac{\sqrt{3}}{411} |V_g| O_u(t) \quad (10)$$

通过构建外环控制模型并完成相关计算,将

外环输出的压力偏差信号作为内环二型模糊控制的输入,进一步细调比例/积分增益,为整个双闭环模糊控制系统的稳定运行奠定基础。

2.2 液压系统回油路压力内环控制

在完成液压系统回油路压力外环控制后,尽管外环控制能够快速收敛压力偏差,为系统提供相对稳定的压力目标参考,但液压系统本身存在复杂的非线性特性,且在实际运行过程中会遭受各种动态扰动的影响。外环控制通常采用较为宏观的控制策略,难以对这类复杂的非线性和动态变化作出精确、快速的响应与调节。因此,本研究引入内环控制,以进一步细化对系统压力的控制,提升控制的精度和稳定性。

内环控制过程中,创建一种压力内环二型模糊控制策略^[21],旨在进一步动态调节控制器参数,提升系统对复杂状况的适应能力,与外环控制配合实现更精确的压力控制。一型模糊集的隶属度范围通常由人为经验确定,但不同设计者对同一事物的理解存在差异。二型模糊系统在一型基础上进行扩展,其隶属度采用模糊集(这种模糊集被称为次隶属度)来描述。二型模糊控制表达式为

$$y_e = V_g \times \int_{Q \in U} \int_{\Delta p \in H_u} \frac{\sigma(u, x)}{(u, x)} \quad (11)$$

式中: U 为论域; H_u 为主隶属度; $\sigma(u, x)$ 为次隶属度; (u, x) 为次隶属度的关联函数。

对论域任意点与该点主隶属度进行笛卡尔积运算,可形成一个关于 y_e 的不确定性覆盖区域。此区域上、下边界由各自的隶属函数来描述,具体如下:

$$\begin{cases} UMF(y_e) = \{(u, \bar{\zeta}_{y_e}(u)) | u \in U\} \\ LMF(y_e) = \{(u, \underline{\zeta}_{y_e}(u)) | u \in U\} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $UMF(y_e)$ 为上隶属度函数; $LMF(y_e)$ 为下隶属度函数; $\bar{\zeta}_{y_e}(u)$ 、 $\underline{\zeta}_{y_e}(u)$ 分别为上、下隶属度函数的隶属程度。

输入回油路压力误差后,模糊器确定其隶属度关系;规则库依据预设模糊规则进行推理,推理结果经降型转化为一型模糊,再经解模糊得到输出值^[22-24]。利用中心降型法,将模糊集合经过降型器处理后的计算结果表示为

$$Y_{\cos}(z) = P_r(t) \cdot [y_o, y_a] \quad (13)$$

式中 y_o 、 y_a 分别为模糊集合输出值的左、右边界。

对式(13)输出值中的相关变量进行二次模

糊处理,将压力偏差、偏差变化率、输出比例增益和积分增益均划分为如下二型模糊集:NB、NM、NS、Z、PS、PM、PB,分别对应负大、负中、负小、零、正小、正中和正大^[25]。

设定内环控制器为 $R_u(t)$,期望压力值为 $P_b(t)$,综合上述内容,将液压系统回油路压力内环模糊控制解析式记作:

$$R_u(t)=L_p(c(t),\dot{c}(t))c(t)+L_i(c(t),\dot{c}(t))$$

(14)

式中: $L_p(c(t),\dot{c}(t))$ 为比例增益,用于对压力偏差进行比例调节; $L_i(c(t),\dot{c}(t))$ 为积分增益,调节压力偏差积分项并消除液压系统稳态误差; $c(t)$ 为 t 时间的压力偏差信号; $\dot{c}(t)$ 为 t 时间的压力偏差变化率。

综上,外环通过 PI 控制快速收敛压力偏差,起到粗调作用;内环通过二型模糊动态调节增益参数,适应非线性与扰动,起到细调作用。双闭环结构通过粗调与细调相结合的方式,有效解决液压系统回油路压力控制中非线性、不确定性及动态扰动问题,实现液压系统回油路压力的精准控制。

3 实验分析

通过实验分析确保所提方案在液压系统回油路压力控制中的可靠性,将目标总推力矢量法、改进超螺旋滑模控制法作为对比方法。图 3 为液压系统回油路实验原理图,其中包含控制系统、液压系统和传感器。液压系统电液比例溢流阀采用二级插装阀结构,压力范围为 10~120 MPa,通流能力为 35 L/min,传感器采样频率是 300 Hz。

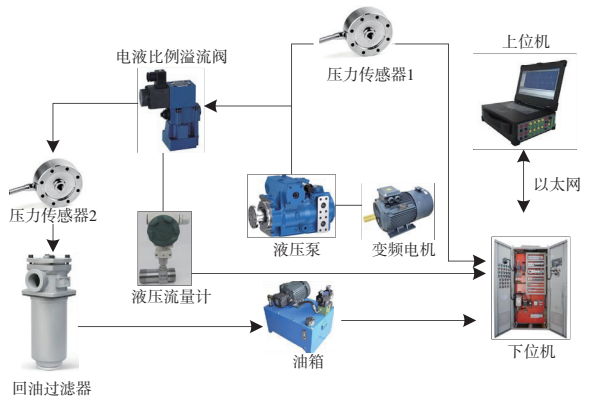


图 3 液压系统回油路实验原理图

实验过程中,算法的参数设置如表 1 所示。

表 1 算法的参数设置

参数类别	参数名称	参数值
外环 PI 控制	比例增益	1.2
	积分增益	0.03
	模糊规则数量/条	49
内环模糊控制	比例增益调整范围	$[-0.2, 0.2]$
	积分增益调整范围	$[-0.05, 0.05]$
	宽度参数/kPa	2
模糊控制隶属度函数	宽度参数/kPa/s	1
	中心点参数	0
	宽度参数	0.1
控制周期	外环控制周期/ms	100
	内环控制周期/ms	20

良好的压力跟踪性能是液压系统稳定运行的前提条件,3 种方法相同实验背景下,液压系统回油路压力跟踪性能实验结果如图 4 所示。(本刊为黑白印刷,相关疑问请咨询作者)

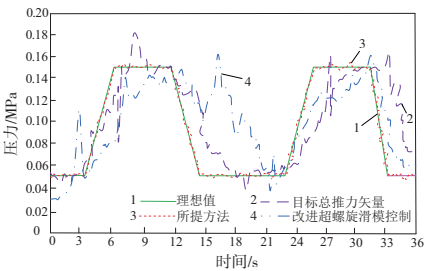


图 4 液压系统回油路压力跟踪能力对比

从图 4 中可以清晰看到,所提方法的压力输出值与理想压力值之间的偏差稳定在 0.01~0.02 MPa 左右,这一偏差范围极小,在实际应用中几乎可以忽略不计。该方法采用双闭环模糊控制算法,能够实时精准感知系统压力变化,并迅速作出相应的控制调整,确保压力输出紧密跟随压力变化趋势。这种特性使得系统能够有效避免压力波动和超调现象的发生,展现出出色的压力跟踪性能和稳定性。在压力跟踪过程中,目标总推力矢量法出现了不同程度的误差。尤其是在系统压力发生快速变化时,该方法无法及时、有效地调整压力输出。这种动态响应滞后的现象严重影响了系统的控制精度。表明该方法缺乏足够的鲁棒性,在面对系统压力的快速变化时,不能快速适应,容易受到外界干扰的影响,导致压力跟踪效果不佳。改进超螺旋滑模控制法在压力跟踪过程中

存在误差,并且系统出现了抖振现象,影响压力跟踪的准确性和稳定性。

为量化压力整体偏差离散程度,进一步反映压力控制的精度,采集大量不同工况下的压力数据,分别计算3种方法液压系统回油路压力控制均方误差,结果如图5所示。

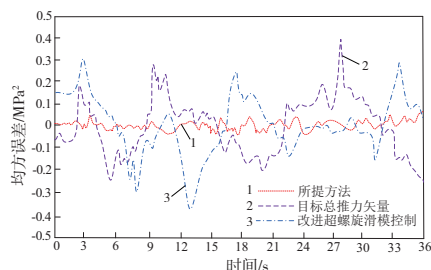


图5 液压系统回油路压力控制均方误差对比

由图5看到,所提方法的压力控制均方误差显著优于对比方法,在整个时间周期内保持低水平且波动较小。这表明其实际压力输出与目标值的偏差平方和平均值最低,压力跟踪精度高、系统稳定性好。这得益于双闭环模糊控制算法的实时感知与快速调整能力,能有效减小压力偏差。目标总推力矢量法的均方误差较高,且在压力频繁变化时波动明显。其控制策略难以适应动态变化,导致实际压力与目标值偏差较大,难以满足高精度需求。改进超螺旋滑模控制法的均方误差也较高且波动频繁。由于液压系统参数复杂且不确定,该方法需精细调整参数,但实际运行中易出现抖振现象,导致压力偏差较大,控制精度不足。

利用阶跃响应实验了解不同方法面对突然的压力变化时的动态响应特性,展现压力控制效率优劣。3种方法液压系统回油路压力控制阶跃响应对比结果可参考图6。

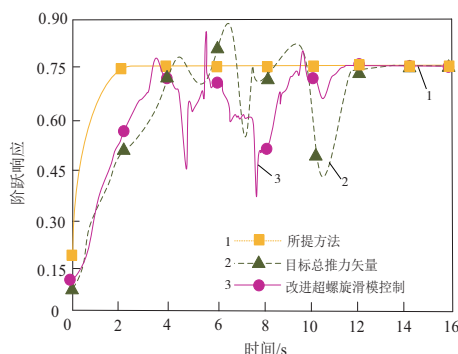


图6 液压系统回油路压力控制阶跃响应对比

观察图6看出,所提方法调节时间明显优于另外两种方法。调节时间即系统从受阶跃输入至

压力稳定在目标压力允许误差范围内所需时间。所提方法能更快使压力稳定,表明其控制算法可快速响应压力突变,及时调整参数让系统趋近目标压力。阶跃响应中,该方法压力峰值无过冲,达峰值后迅速稳定在目标值附近,稳定性出色,能有效抑制压力过度波动,使压力平稳趋近目标值,增强系统对突发工况的适应能力,压力突变时可快速稳定恢复。目标总推力矢量法调节时间较长,面对压力阶跃变化,需更多时间使压力稳定,反映出其控制算法响应压力突变速度慢,难以及时调整参数适应压力变化。从曲线看,阶跃响应中该方法压力波动明显,达稳定前起伏大,控制精度和稳定性欠佳,应对突发工况时压力控制效果不理想。改进超螺旋滑模控制法调节时间不如所提方法,动态性能较差。面对压力突变,其控制系统调整慢,压力稳定耗时久。图6曲线显示,阶跃响应中该方法存在抖振现象,压力在目标值附近波动明显。这是因为该方法需精细调整,而系统参数复杂不确定,难以找到适用于所有工况的最优参数,影响压力控制稳定性。

综上,较低的均方误差(图4)与快速的阶跃响应(图5)表明,所提方法在动态和稳态性能上均优于对比方法,验证了双闭环结构对非线性扰动的适应性。

4 结语

本文针对液压系统回油路压力控制中存在的非线性、参数不确定性和动态扰动问题,提出了一种基于双闭环模糊控制的方法,得出以下结论:

1) 理论模型的有效性:通过建立阀芯力平衡解析式、流量连续性方程及节流口降压模型,结合回油路沿程损失计算,推导出压力总损失表达式。该模型准确刻画液压系统回油路的动态特性,为控制策略设计提供了理论基础。

2) 双闭环控制策略的优越性:a) 外环PI控制,以压力偏差为输入,通过比例积分调节实现快速粗调。b) 内环二型模糊控制,采用动态调整的比例增益和积分增益,有效适应非线性与扰动。其不确定性覆盖区域和中心降型法显著提升了参数自适应性,压力跟踪均方误差降低至0.01~0.02 MPa,较传统方法显著提高。

3) 在阶跃响应实验中,该方法能够快速响应压力变化,在保持无超调特性的同时,显著缩短了系统稳定时间。这种优异的动态响应性能有效提升了系统应对突发工况的能力,验证了控制策略

的鲁棒性。

本研究为液压系统回油路压力控制提供了有效的解决方案,特别适用于对控制精度和响应速度要求较高的工业场景。未来研究可重点关注基于深度学习的参数优化和液压-机械耦合系统的集成控制等方向。

参考文献:

- [1] 张玉,杨宏万,王鹏. 自适应遗传模糊双闭环控制的微电网母线稳压[J]. 计算机仿真, 2023, 40(1): 107-111.
- [2] 周兆钟,尹明德,王南越,等. 基于模糊控制在线整定新趋近律的速度调节器研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(5): 21-29.
- [3] 汪首坤,王晓军,王亮,等. 基于转速转矩双闭环的液黏调速控制方法研究[J]. 液压与气动, 2022, 46(9): 45-52.
- [4] 朱叶艇,龚卫,秦元,等. 基于目标总推力矢量的盾构推进油缸压力闭环控制技术[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(5): 170-178.
- [5] 张越,郭中阳,黄孝慈,等. 基于改进超螺旋滑模控制的线控制动系统控制方法[J]. 汽车技术, 2024(9): 18-24.
- [6] 王天翔,崔涛,张付军,等. 基于 MPC 的电动复合增压柴油机进气压力控制[J]. 兵工学报, 2024, 45(10): 3642-3653.
- [7] WANG Z Y, LIU X C, MOU Q R, et al. Extended-state-observer-based pressure compensation anti-disturbance control method for hydraulic secondary regulation system[J]. Nonlinear Dynamics, 2025, 113(9): 9931-9948.
- [8] 徐宝昌,尤鹏翔,陈贻祺,等. 基于强化学习的液动节流阀阀位控制策略[J]. 化工自动化及仪表, 2023, 50(4): 419-427, 476.
- [9] 李永安,朱明亮,王宏伟,等. 高速开关阀先导驱动高水基大流量比例调速阀的设计与仿真[J]. 液压与气动, 2024, 48(2): 60-67.
- [10] 汪浒江,王涛,林宇,等. 浮动式配流盘柱塞泵马达系统动力学建模及特性研究[J]. 汽车工程, 2024, 46(11): 2122-2132.
- [11] 李银银,周志宏,曾华,等. 连续管注入头与滚筒液压系统的耦合动力学[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(5): 1945-1952.
- [12] 张天爱,张宏,孙娜,等. 基于 AMESim 的电液执行系统流量匹配阀结构参数优化[J]. 机电工程, 2024, 41(6): 969-979.
- [13] 陈远,唐炜,程鲲鹏,等. 面向调节阀的流量控制仿真研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(22): 184-189.
- [14] 程准,鲁植雄. 拖拉机液压传动系统特性模型修正与参数辨识[J]. 农业工程学报, 2022, 38(19): 33-41.
- [15] 李金龙,张宇,邓海顺,等. 旋转配流盘式恒压双排轴向柱塞泵的建模和特性分析[J]. 液压气动与密封, 2024, 44(12): 1-7.
- [16] 宋磊,郑凯. 基于 AMESim 的起重机支腿机构液压系统优化与仿真[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(1): 157-160.
- [17] 李向东,尚书旗,陈明东,等. 马铃薯收获机多级输送装置机械损伤研究[J]. 农机化研究, 2025, 47(3): 138-145.
- [18] 周海勇,王琳,郑博寒,等. 2500 kJ 海上作业打桩锤液压系统液阻结构参数分析与实验[J]. 液压与气动, 2023, 47(6): 64-70.
- [19] 吕旭旭,邵天章,赵锦成,等. 基于变论域模糊 PID 控制的逐脉冲算法逆变技术研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(12): 83-88.
- [20] 夏正龙,何颖,李灿. 基于模糊算法的 MCR-CPT 移相控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2024, 58(3): 88-92.
- [21] 黄自鑫,汪伟,王乐君. 基于模糊控制的 PWM 整流器电压调速策略[J]. 深圳大学学报(理工版), 2024, 41(1): 101-107.
- [22] 龚仁喜,杨元甲,王保平. 改进粒子群优化的双向 DC/DC 变换器模糊 PI 控制[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2022, 43(6): 37-43, 7.
- [23] 赵越,董明刚. 基于模糊规则库的快速区间多目标优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2025, 31(2): 604-615.
- [24] 秦毅峰,刘志全. 基于模糊规则的鲁棒预测舵减摇控制[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(4): 206-214.
- [25] 回彦年,董伟,柴建云. 基于模糊逻辑的混合动力飞机能量管理策略研究[J]. 推进技术, 2025, 46(2): 21-29.

收稿日期:2025-07-23