

DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2025.20.009

文献引用: 魏列江, 万思毅, 路全锋, 等. 复合泵控液压系统模糊 PID 控制特性研究[J]. 机床与液压, 2025, 53(20): 64-70.

Cite as: WEI Liejiang, WAN Siyi, LU Quanfeng, et al. Study on fuzzy PID control characteristics of compound pump-controlled hydraulic systems [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2025, 53(20): 64-70.

复合泵控液压系统模糊 PID 控制特性研究

魏列江^{1,2}, 万思毅^{1,2}, 路全锋^{1,2}, 何小康^{1,2}

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃兰州 730050; 2. 兰州理工大学特种泵阀及流控系统教育部重点实验室, 甘肃兰州 730050)

摘要: 为提高泵控液压缸系统的动态响应性能与控制精度, 解决传统 PID 控制在多工况及能效优化方面的不足, 提出一种基于模糊规则的 PID 参数实时整定复合控制策略。根据系统负载流量与压力需求, 实时调节电机转速与液压泵排量, 在保证动态性能的同时实现运行能效优化。在 AMESim 中建立复合泵控液压缸系统模型, 并在 MATLAB/Simulink 中构建模糊 PID 控制器, 开展联合仿真分析。结果表明: 与传统 PID 控制相比, 所提模糊 PID 控制策略使系统阶跃响应时间缩短 18%, 超调量降低 22%, 有效提升了系统的响应速度与控制精度。该控制方法能够适应复合泵控液压系统的多工况需求, 具有良好的参数协调能力与能效优化效果, 为类似系统的控制策略设计提供了参考。

关键词: 复合泵控液压缸系统; 联合仿真; 模糊控制; 响应时间

中图分类号: TH137.52

Study on Fuzzy PID Control Characteristics of Compound Pump-Controlled Hydraulic Systems

WEI Liejiang^{1,2}, WAN Siyi^{1,2}, LU Quanfeng^{1,2}, HE Xiaokang^{1,2}

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China; 2. Key Laboratory of Advanced Pumps, Valves and Fluid Control System of the Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China)

Abstract: To enhance the dynamic response performance and control accuracy of pump-controlled hydraulic cylinder system, and to address the limitations of traditional PID control in multi-condition adaptability and energy efficiency optimization, a composite control strategy was proposed based on fuzzy-rule-based real-time tuning of PID parameters. According to the system load flow and pressure requirements, the motor speed and hydraulic pump displacement were adjusted in real time to optimize operational energy efficiency while ensuring dynamic performance. A model of the composite pump-controlled hydraulic cylinder system was established using AMESim, and a fuzzy PID controller was constructed in MATLAB/Simulink for co-simulation analysis. The results demonstrate that compared with traditional PID control, the proposed fuzzy PID control strategy reduces the system's step response time by 18% and decreases overshoot by 22%, effectively improving the system's response speed and control accuracy. This control method can adapt to the multi-condition requirements of composite pump-controlled hydraulic systems, exhibiting strong parameter coordination capability and energy efficiency optimization effects, thereby providing a valuable reference for the design of control strategies in similar systems.

Keywords: compound pump-controlled hydraulic cylinder system; co-simulation; fuzzy PID control; response time

0 前言

液压传动系统以其相同功率输出时所需的空间紧凑和质量轻盈的特点而著称; 且其能够在运行过程中精确控制速度和方向, 因而在航空航天、工程机械和船舶工业等领域被广泛应用。随着绿色低碳发展与节能减排理念的不断深入, 传统阀控系统存在着较大的溢流和节流损失^[1-2], 这与节能减排理念严重相悖,

因而其应用场合受到限制。因此对液压传动系统开展节能化、绿色化研究成为热门研究方向^[3-4]。与此同时, 虽然泵控系统因其具有良好的节能特性而备受青睐, 但传统泵控系统由于响应速度较慢, 在需要快速动态响应的应用场景中面临一定的局限。为了提高响应速度并降低液压系统的能耗, 当前主要途径包括提升元器件性能、优化控制策略以及实现功率

收稿日期: 2024-11-28

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFB3406704)

作者简介: 魏列江 (1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事液压技术方面的科研和教学。E-mail: weiliejiang@126.com。

匹配^[5-6]。

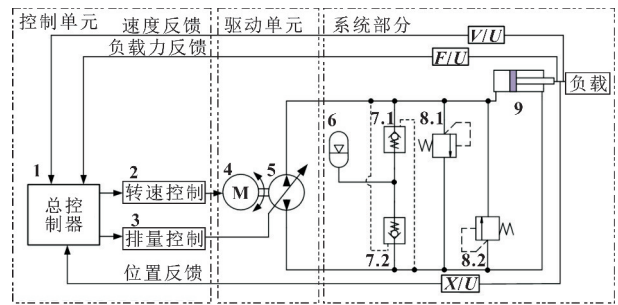
针对上述功率不匹配问题,不少研究人员通过对效率的最佳优化来解决功率不匹配问题,以减少系统溢流和节流损失。张德^[7]通过建立液动力源的能耗模型,由效率最佳点求得最佳转速与最佳排量,从而进行功率匹配。研究显示,复合调速系统的使用能够降低能耗,并且更容易实现最优的功率匹配。李前坤^[8]提出一种基于最佳效率的电机与定量泵功率匹配方案,从而确保液压泵的输出流量可满足液压系统的需求,同时让电机处于效率最佳状态。杨波^[9]借助中位数法对负载变化规律予以识别。杨世平等^[10]提出了一种旨在提高动力系统能效的功率匹配控制策略,并设计了一套相应的模糊控制算法来实施这一策略,其对提高燃油经济性有着显著效果。刘荣华^[11]设计了一种液压挖掘机功率匹配集成控制系统,实现液压泵与发动机实时匹配,燃油消耗降低不低于 5.6%。

此外,研究人员针对模糊控制特性也进行了深入研究。张瑞东等^[12]提出了一种采用模糊自适应 PID 控制策略的高速列车悬挂系统智能控制方法,其研究成果表明,该方法显著增强了列车运行的平稳性能,并大幅提升了乘客的乘坐舒适度体验。赵伯鸾^[13]提出了一种融合补偿调整机制的自适应模糊 PID 控制算法,有效提升了拖拉机液压系统动态控制性能。李冬^[14]设计了一种采用 PID 模糊控制技术的闭环泵控系统,结果显示,系统响应时间减少了 20%,同时控制精度也得到了提高。李文华等^[15]基于伺服电机驱动的内啮合齿轮泵系统,研发了一种自适应模糊 PID 控制器,旨在通过其控制策略来增强系统的稳定性。

本文作者以复合泵控液压缸系统为对象,分析其动态特性和控制机制。通过研究系统的工作原理和响应特性,旨在减少响应时间和超调量,提升系统的响应速度和稳定性。为此,文中引入模糊控制方法,以克服传统控制策略在处理非线性、时变性及不确定性问题上的局限。模糊控制能够有效应对系统的复杂性,并在不确定情况下优化控制,从而实现更快、更平稳的响应。

1 复合泵控液压缸系统的工作原理

如图 1 所示,电机作为该系统的关键驱动单元之一,将电能转换为机械能,通过联轴器将电机的旋转动力传递给液压泵,最终液压泵将机械能转换为液压能,其对油液压缩产生高压油液进而输出至系统以驱动执行元件进行各种工作。系统采用了轴向柱塞泵作为变排量液压泵,这种泵能够通过电信号控制其排量,从而调节输出流量。系统通过同时调整电动机的转速和液压泵的排量,共同调节实现对工作流量的精确控制,满足不同工作场景的需求,实现高效、节能的运行。



1—总控制器 2—转速控制器 3—排量控制器 4—变速电机
5—变量泵 6—蓄能器 7—液控单向阀 8—溢流阀 9—液压缸

图 1 复合泵控系统原理

Fig. 1 Principle of the compound pump control system

2 数学模型

2.1 系统数学模型

(1) 三相异步电机数学模型

电压方程:

$$u_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + p\psi_{s\alpha} \quad (1)$$

$$u_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + p\psi_{s\beta} \quad (2)$$

电磁转矩方程:

$$T_e = p_m L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (3)$$

转矩平衡方程:

$$T_e - T_L = \frac{J}{p_m} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (4)$$

式中: R_s 指定子的电阻; p_m 指电机极对数; $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ 分别指在 α 、 β 坐标系下定子电压; $\psi_{s\alpha}$ 、 $\psi_{s\beta}$ 分别指坐标系下三相绕组定子磁链; i_{sd} 、 i_{rd} 指电机主轴上的转动惯量; T_L 指电机的转矩; T_e 指电磁转矩。

(2) 变量泵流量方程

$$q_p = V_{pmax} \cdot i \cdot n - C_{ip}(p_L - p_i) - C_{op} p_L \quad (5)$$

式中: V_{pmax} 指液压泵的最大排量; i 指实际排量与最大排量之比; n 指液压泵转速; C_{ip} 指液压泵内泄漏系数; C_{op} 指液压泵外泄漏系数; p_L 指负载压力; p_i 为液压泵的入口压力。

2.2 液压缸模型

液压缸的运动方程描述了液压缸的推力与活塞的加速度之间的关系。假设液压缸受到的总力是液压缸产生的推力和摩擦力的差,活塞的加速度和位移可以通过以下动力学方程描述:

$$F_{load} = m \cdot \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + B_p \frac{dx(t)}{dt} = p \cdot A - f \quad (6)$$

式中: F_{load} 指液压缸的负载; p 指液压缸腔内的压力; A 指液压缸活塞的横截面积; B_p 指活塞及负载的黏性系数; f 指活塞的摩擦力; m 指活塞的质量; $x(t)$ 指活塞位移; $\frac{d^2 x(t)}{dt^2}$ 指活塞加速度。

在泵控系统中,液压泵的输出流量 Q 和压力 p 是调节液压缸运动的关键参数。液压泵的流量与压力之

间的关系可以根据系统特性描述。泵的输出流量通常和泵的排量、转速和调节器控制有关。假设液压泵的流量 Q_{pump} 与排量 V_p 和转速 n 成正比:

$$Q_{\text{pump}} = V_p \cdot n \quad (7)$$

液压系统中的流体动力学也会对系统的响应产生影响,主要包括流体的惯性、压缩性、泄漏效应等。对于泵控液压缸系统,泄漏流量 Q_{leak} 是一个重要的因素,它会影响系统的压力和流量。液压泵和液压缸之间的压力损失也需要通过系统的总效率进行综合考虑。泵控制系统中的泄漏流量通常可由以下方程表示:

$$Q_{\text{leak}} = C_{\text{leak}} \cdot \Delta p \quad (8)$$

式中: Q_{leak} 指泄漏流量; C_{leak} 指泄漏系数; Δp 指液压缸腔内的压力差。

泵控液压缸的综合数学模型可以结合液压泵的流量、压力控制,以及液压缸的推力与运动方程。考虑到液压泵的流量与液压缸运动之间的关系,可以得到如下控制方程:

$$m \cdot \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + B_p \frac{dx(t)}{dt} = \left(\frac{V_p \cdot n}{A} - Q_{\text{leak}} \right) \cdot A - f \quad (9)$$

式中: $V_p \cdot n/A$ 指泵的流量转化为活塞的速度控制; B_p 指活塞及负载的黏性系数; Q_{leak} 指泄漏造成的流量损失; f 指摩擦力,通常可以用摩擦因数和负载的正压力计算。

2.3 模糊 PID 控制器

通过模糊控制算法对液压缸的位移误差和泵的流量进行实时调节,可以有效减少液压缸的响应时间和超调量,提高系统的动态响应速度。在复合泵控液压系统中,模糊控制能够根据实际工作环境变化(如负载波动、流量变化等)自动调整控制参数,实现自适应控制,优化系统性能。

PID 控制器在工业化和过程控制中有着举足轻重的地位。其标准形式可表示为:

$$\begin{cases} u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \\ e(t) = y(t) - r(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $u(t)$ 指控制器的输出信号; $e(t)$ 指误差信号,定义为设定值(目标值)与测量值(实际值)之间的差; K_p 是比例增益或比例系数; K_I 是积分增益或积分系数; K_D 是微分增益或微分系数。比例项根据误差的大小直接产生一个控制动作,误差越大,控制动作越强;积分项用于消除静态误差,使系统达到零稳态误差;微分项预测未来误差的变化趋势,减少超调,并改善动态响应。

模糊控制系统的核心组件是模糊控制器,其效能受到多个因素的显著影响,包括控制器的设计架构、

采用的模糊规则、推理合成的算法以及决策的模糊化方法。图 2 呈现了模糊控制器的详细构成。

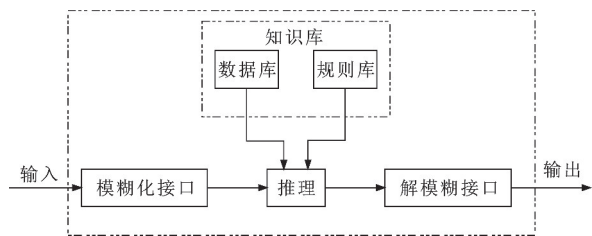


图 2 模糊控制器的组成框图

Fig. 2 Composition block diagram of fuzzy controller

模糊自适应 PID 控制器是一种特殊的控制器,它利用模糊逻辑来实时调整 PID 控制器的比例、积分和微分参数。这种控制器以误差 (e) 和误差变化率 (e_c) 作为输入,根据预设的模糊控制规则动态地修改 PID 参数,以适应不同的工作条件。它的突出特点在于无需精确的被控对象数学模型,同时能够适应环境条件或过程参数的变化。此控制器特别适合用于控制具有非线性特性和多变量的复杂系统,因其具有较快的收敛速度和优异的鲁棒性。自适应模糊 PID 控制器结构如图 3 所示。

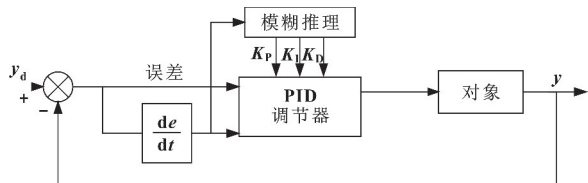


图 3 模糊自适应控制器结构

Fig. 3 Structure of adaptive fuzzy controller

2.4 控制器的设计

通过模糊控制调整 PID 参数,可以根据不同工作条件动态优化系统的响应速度和稳态精度。模糊规则根据误差、误差变化率以及负载和流量的变化来自动调整 K_p 、 K_I 、 K_D 增益,从而提升系统的稳定性和性能。

(1) 输入/输出变量

模糊控制系统的输入为位置误差 e 和误差变化率 e_c ,其对应的量化域分别为 E 、 E_c 。控制规则根据位置误差和误差变化率的大小调整输出量 K_p 、 K_I 、 K_D 的值,以适应不同时刻的控制需求,从而实现系统的稳定与高效控制。

(2) 模糊控制规则

鉴于三角形函数在定义域内分布均匀且具有较高的灵敏度,因此选择了三角形隶属度函数^[16]。输入/输出被划分为 NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)七个评价等级,相应的隶属度函数曲线见图 4。并结合实际经验制定以下模糊控制规则:①当位置误

差 e 较大时，增大 K_p 以加快系统响应速度，迅速减小误差；当位置误差 e 较小时，减小 K_p ，以防止过度调节导致振荡或超调；位置误差变化率 e_c 较大时，可维持或略微减小 K_p ，防止因快速变化导致系统不稳定。②当位置误差 e 较大时，适当减小 K_i ，避免积分作用过强导致系统积累较大的超调；当位置误差 e 和位置误差变化率 e_c 为中等值时， K_i 适中，主要用于消除稳态误差；当误差 e 较小时，增大 K_i ，逐步消除残余误差并提高稳态精度。③当位置误差 e 较大时，增大 K_d ，以有效抑制误差的急剧变化，增强系统稳定性；当位置误差 e 和位置误差变化率 e_c 取中等时， K_d 适中，此时微分作用对系统调节性能的影响尤为明显，有助于平衡响应速度与稳定性；当位置误差 e 较小时，减小 K_d ，以防微分作用过于强烈导致系统出现振荡。

根据上述控制规则，通过仿真实验对其进行细化与优化，最终制定了表 1 所示的模糊控制规则。

(3) 模糊推理和去模糊化

利用 Mamdani 型模糊逻辑推理机制，向模糊 PID 控制器中输入了 49 个模糊控制规则以执行相关计算。在后续的去模糊化步骤中，采取了面积重心法（即 Centroid 方法）来准确地解析推理后的输出结果。这一过程的最终输出以三维曲面图的形式展示，具体如图 5 所示。

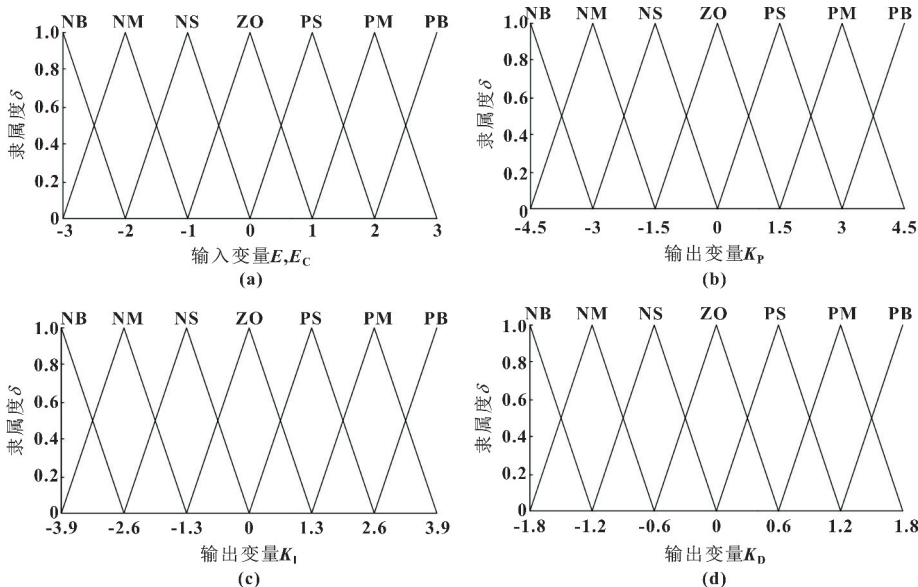


图 4 输入变量 E 、 E_c (a) 和输出变量 K_p (b)、 K_i (c)、 K_d (d) 的隶属度函数

Fig. 4 Membership functions of input variables E, E_c (a) and output variable K_p (b), K_i (c) and K_d (d)

表 1 K_p 、 K_i 、 K_d 模糊控制规则

Tab. 1 Fuzzy control rule of K_p, K_i and K_d

| e_c | e | | | | | | |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| NB | PB/PB/PS | PB/PB/PS | PM/NM/ZO | PM/NM/ZO | PS/NM/ZO | PS/ZO/PB | ZO/ZO/PB |
| NM | PB/PB/PS | PB/PB/NS | PM/NM/NS | PM/NM/NS | PS/NS/ZO | ZO/ZO/PM | ZO/ZO/PM |
| NS | PM/NM/PB | PM/NM/PB | PS/NS/NM | PS/NS/NS | ZO/ZO/ZO | NS/PS/PM | NM/PS/PM |
| ZO | PM/NM/PB | PS/NS/NM | PS/NS/NM | ZO/ZO/NS | NS/PS/ZO | NM/PS/PM | NM/PM/PM |
| PS | PS/NS/PB | PS/NS/PS | ZO/ZO/NS | NS/PS/NS | NS/PS/ZO | NM/PM/PS | NM/PM/PS |
| PM | ZO/ZO/NM | ZO/ZO/NS | NS/PM/NS | NS/PS/NS | NM/PM/ZO | NM/PB/PS | NB/PB/PS |
| PB | ZO/ZO/PS | NS/PS/ZO | NS/PM/ZO | NM/PM/ZO | NM/PB/ZO | NB/PB/PB | NB/PB/PB |

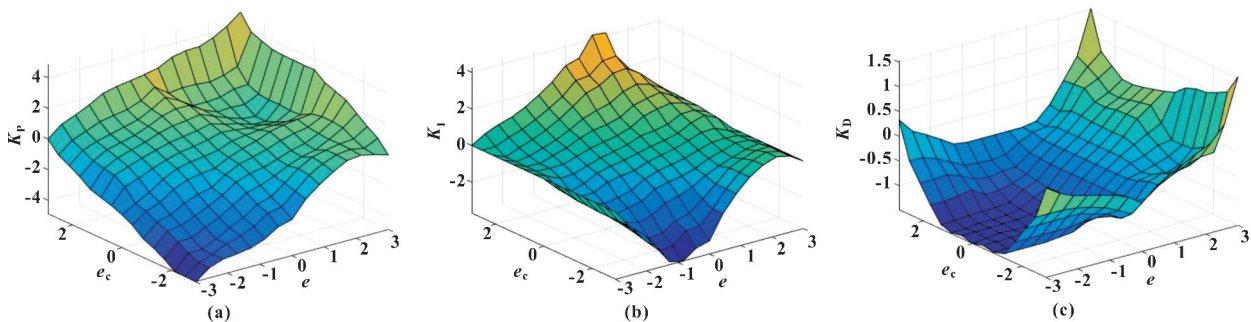


图 5 K_p (a), K_i (b) 和 K_d (c) 的模糊曲面

Fig. 5 Fuzzy surface of K_p (a), K_i (b) and K_d (c)

3 MATLAB-AMESim 联合仿真分析

在复合泵控液压系统中，通过对液压泵排量的调节实现对液压缸位置的闭环控制。由于液压泵排量调节的响应时间对系统的位置控制响应有着显著影响，在构建系统仿真模型时，依据斜盘式柱塞泵的工作原理，详细建立了变量泵模型，并进行了封装处理。这样可以更准确地模拟实际工况，提高仿真的可靠性和实用性。

图 6 所示，搭建了一个斜盘式轴向柱塞泵的仿真模型，其中 2 端口为控制信号，该信号驱动阀芯移动，进而使得变量活塞产生位移，以此来调整柱塞泵斜盘的角度。1、3 端口分别对应变量柱塞泵的低、高压工作油口，4 号端口用于输入转速信号。

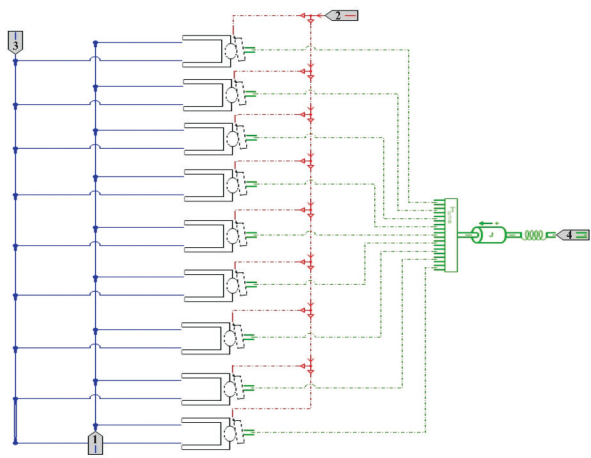


图 6 变量柱塞泵封装仿真模型

Fig. 6 Simulated model of variable displacement piston pump packaging

如图 7 所示，建立了泵控液压缸系统的仿真模型。模型采用封装的变排量液压泵模块，并在液压库中选用溢流阀、液控单向阀和气囊式蓄能器等元件。根据变转速电机驱动变排量液压泵控制液压缸系统的工作原理完成模型的构建，并设置相关参数以满足仿真需求。

在 AMESim 中构建了联合仿真接口，其中液压缸位移信号和液压缸运行功率信号作为输入，电机转速

控制信号和液压泵排量控制信号作为输出。系统仿真模型的关键参数配置如表 2 所示。通过该接口实现了与其他仿真平台的高效数据传递，为系统性能评估和控制策略验证奠定了基础。

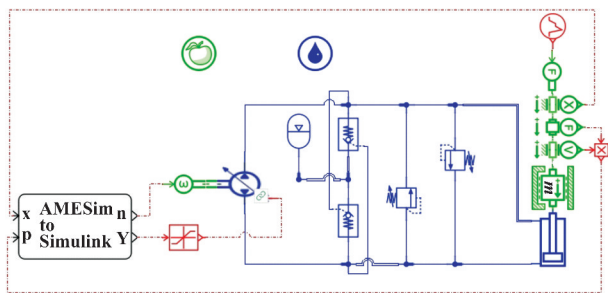


图 7 复合泵控系统 AMESim 模型

Fig. 7 The AMESim model of the compound pump-controlled system

表 2 泵控系统主要参数

Tab. 2 Main parameters of pump control system

| 参数 | 数值 |
|---|-------|
| 变量泵最大排量/($\text{mL} \cdot \text{r}^{-1}$) | 45 |
| 电机最大转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$) | 2 940 |
| 电机额定转矩/($\text{N} \cdot \text{m}$) | 60 |
| 电机额定功率/kW | 18.5 |
| 液压缸杆径/mm | 28 |
| 液压缸缸径/mm | 40 |
| 溢流阀压力/MPa | 20 |
| 蓄能器体积/L | 5 |
| 蓄能器预充压力/MPa | 2 |

如图 8 所示，文中在 Simulink 中搭建了复合控制策略模型，并通过数据交互模块作为数据接口，与 AMESim 软件实现了数据交换，完成了联合仿真。该接口的输入信号包括电机转速控制信号和液压泵排量控制信号，用于调节系统的驱动和动力输出；输出信号为液压缸位移信号和负载功率信号，反映系统的实际运动状态与能效表现。通过这种方式，能够实现对复合控制策略在不同工况下的动态特性、响应速度及稳定性的全面分析与验证。

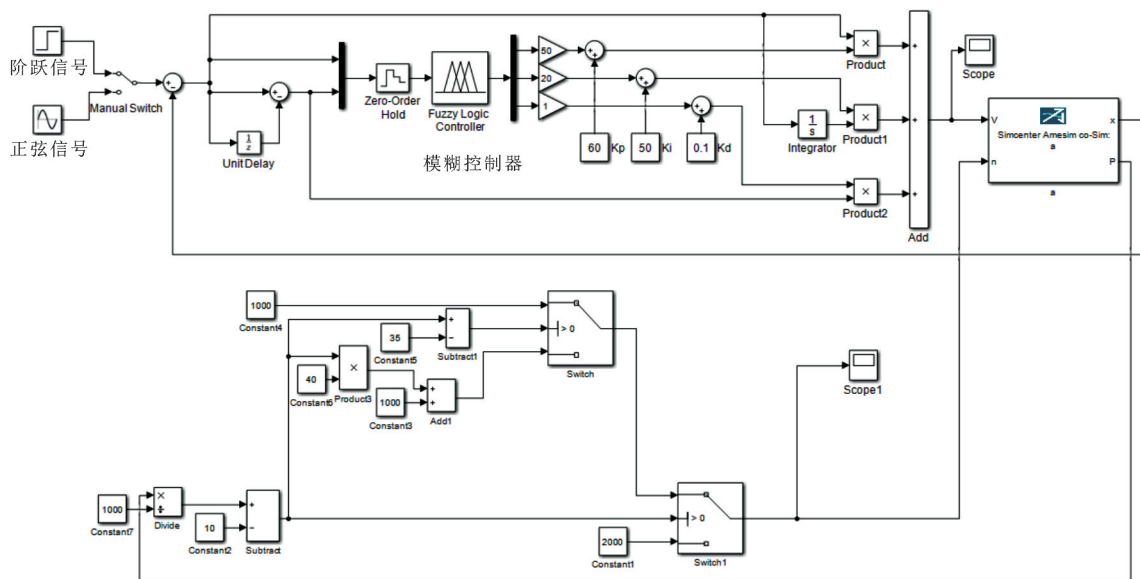


图 8 复合泵控系统 Simulink 控制模型

Fig. 8 The Simulink control model of the compound pump-controlled system

4 仿真分析

4.1 正弦位移信号响应分析

对比分析复合泵控液压系统模糊控制与传统 PID 控制系统的性能表现，设置液压缸正弦位移控制信号作为输入条件。控制信号的幅值为 120 mm，周期为 π s，分别对两种控制系统模型进行仿真研究，以探讨不同控制策略在相同条件下的动态响应特性和控制效果。

如图 9 所示，复合泵控液压系统模糊控制与传统 PID 控制系统对于幅值 120 mm、周期为 π s 的正弦位移信号均可以实现良好位置跟踪效果，具有良好的动态跟随特性。其中复合泵控模糊控制系统位移跟踪相位偏差 0.1° 左右，传统 PID 控制系统位移跟踪相位偏差约 0.25° 。由此可见，复合泵控模糊控制系统在动态响应方面表现出更高的精确性，其相位偏差明显小于传统 PID 控制系统。

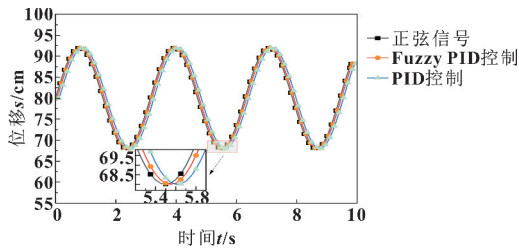


图 9 正弦位移信号响应曲线对比

Fig. 9 Comparison of sine displacement signal response curves

4.2 阶跃位移信号响应分析

设置阶跃位移控制信号作为系统输入条件，在 $t=0$ s 时施加幅值 100 mm 的阶跃位移控制信号，分别对复合泵控模糊 PID 控制系统与传统 PID 系统进行仿真研究，系统地分析两种控制系统在阶跃输入条

件下的动态响应特性、稳态性能以及控制精度，以评估其控制效果和适用性。

如图 10 所示，在两种控制方式下，液压缸对位置阶跃控制信号均表现出快速响应的特性。在传统 PID 控制系统中，液压缸在 0.598 s 内达到目标位置（第一次到达稳态值），其超调量为 24.6%，稳态误差为 2 mm，相对于目标位移（100 mm），误差占比 2%。然而，复合泵控模糊 PID 控制系统在 0.49 s 内达到目标位置，超调量为 2.6%，稳态误差约为 0.6 mm，误差占比为 0.6%。通过对比可以看出，复合泵控模糊控制系统在位置响应时间上较复合泵控传统 PID 控制系统缩短了 0.108 s，其响应时间减少 18%，超调量减少了 22%，稳态误差降低了 1.4%。在实际应用中，复合泵控模糊 PID 控制系统由于误差占比相对较小，基本可以忽略不计，表现出更优的动态响应性能和稳态精度。

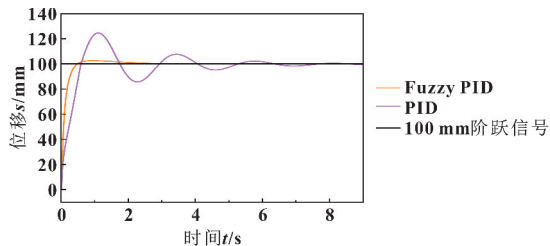


图 10 模糊 PID 控制和 PID 控制的响应对比

Fig. 10 Response comparison of fuzzy PID control and PID control

5 结论

文中针对传统泵控系统和直驱系统响应速度慢、调节范围窄，与负载参数适配难，复杂工况能量损失

大等问题进行了深入的研究, 推导建立了数学模型, 针对系统动态性能和控制精度进行分析后得到如下结论:

(1) 相比于传统 PID 控制, 复合泵控模糊 PID 控制的液压缸系统的响应时间减少 18%, 意味着系统能够更快地对输入信号做出反应, 从而提高了系统的实时性和工作效率。

(2) 模糊 PID 控制通过模糊逻辑, 能够更好地调整控制参数, 从而有效地降低 22% 超调量。这使得系统的输出更加平稳, 减少了振荡和波动, 提高了系统的控制精度和可靠性。

(3) 模糊 PID 控制显著提升了复合泵控系统的跟踪能力, 优化了动态响应, 减少了超调量, 确保了稳态精度, 并能有效应对外部扰动和负载变化。

参考文献

- [1] 樊一宁, 杜常清, 邹斌, 等. 电控正流量挖掘机分工况功率匹配研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(19): 17-24.
FAN Y N, DU C Q, ZOU B, et al. Research on power matching of electronically controlled positive flow excavator under different working conditions[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(19): 17-24.
- [2] 冀宏, 左嘉韵, 程源. 工程机械液压元件及节能液压系统的发展与思考[J]. 液压与气动, 2013, 37(5): 1-8.
JI H, ZUO J Y, CHENG Y. Development and thinking of hydraulic component and energy-saving system in construction machinery[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2013, 37(5): 1-8.
- [3] NASKOUDAKIS I, PETROUTSATOU K. A thematic review of main researches on construction equipment over the recent years[J]. Procedia Engineering, 2016, 164: 206-213.
- [4] 焦宗夏, 吴帅, 李洋, 等. 液压元件及系统智能化发展现状及趋势思考[J]. 机械工程学报, 2023, 59(20): 357-384.
JIAO Z X, WU S, LI Y, et al. Development status and trends of the intelligence of hydraulic components and systems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(20): 357-384.
- [5] 刘彪, 权龙, 葛磊, 等. 转速排量复合控制电驱液压挖掘机能耗特性研究[J]. 液压与气动, 2020, 44(5): 7-13.
LIU B, QUAN L, GE L, et al. Research on energy consumption characteristics of variable speed and variable displacement electric drive hydraulic excavator[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, 44(5): 7-13.
- [6] GE L, QUAN L, ZHANG X G, et al. Power matching and energy efficiency improvement of hydraulic excavator driven with speed and displacement variable power source[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(1): 100.
- [7] 张德. 复合调速液压系统功率匹配及稳定性分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
ZHANG D. Power matching and stability analysis of compound speed regulating hydraulic system[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021.
- [8] 李前坤. 电动挖掘机电机效率优化与流量匹配方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
LI Q K. Research on motor efficiency optimization and flow matching method of electric excavator[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [9] 杨波. 全液压力裂车功率节能匹配优化[J]. 过程工程学报, 2017, 17(4): 853-858.
YANG B. Optimization of power matching on energy-saving for the hydraulic-driven fracturing truck[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2017, 17(4): 853-858.
- [10] 杨世平, 余浩, 刘金刚, 等. 液压挖掘机动力系统功率匹配及其节能控制[J]. 机械工程学报, 2014, 50(5): 152-160.
YANG S P, YU H, LIU J G, et al. Research on power matching and energy saving control of power system in hydraulic excavator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(5): 152-160.
- [11] 刘荣华. 液压挖掘机功率匹配控制系统研究[J]. 机床与液压, 2015, 43(10): 111-115.
LIU R H. Research on the power matching control system for the hydraulic excavators[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(10): 111-115.
- [12] 张瑞东, 孟建军, 李德仓, 等. 高速列车半主动悬挂系统模糊自适应 PID 控制研究[J]. 铁道机车车辆, 2023, 43(2): 1-7.
ZHANG R D, MENG J J, LI D C, et al. Study on fuzzy adaptive PID control of high-speed train semi-active suspension system[J]. Railway Locomotive & Car, 2023, 43(2): 1-7.
- [13] 赵伯鸾. 基于自适应模糊 PID 控制下拖拉机液压系统的优化[J]. 农机化研究, 2024, 46(3): 223-227.
ZHAO B L. Optimization of tractor hydraulic system based on adaptive fuzzy PID control[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(3): 223-227.
- [14] 李冬. 基于 PID 模糊控制器的闭式泵控系统特性研究与分析[J]. 机床与液压, 2020, 48(11): 111-114.
LI D. Characteristics study and analysis of closed pump control system based on PID fuzzy controller[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(11): 111-114.
- [15] 李文华, 刘娇, 柴博. 节能液压泵模糊 PID 控制系统研究与仿真[J]. 控制工程, 2017, 24(7): 1347-1351.
LI W H, LIU J, CHAI B. Research and simulation of energy efficient fuzzy PID control system for hydraulic pump stations[J]. Control Engineering of China, 2017, 24(7): 1347-1351.
- [16] 宋昊举, 李桂琴, 熊旸, 等. 基于 Fuzzy-PID 的负载敏感挖掘机位姿控制策略[J]. 液压与气动, 2023, 47(8): 50-57.
SONG H J, LI G Q, XIONG X, et al. Trajectory control strategy for load sensitive excavator based on Fuzzy-PID[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2023, 47(8): 50-57.