

融合强化学习自适应鲁棒控制算法的异构双阀 协调控制策略仿真及实验

苏世杰^{1*} 程泳钦¹ 胡毅^{1,2} 何建辉¹ 杨书吉¹

1. 江苏科技大学机械工程学院, 镇江, 212003

2. 航天晨光股份有限公司, 南京, 211100

摘要:为提高异构双阀电液伺服系统的控制性能,在融合强化学习与自适应鲁棒控制算法的异构双阀协调控制策略SAC-ARC的基础上,开展SAC-ARC控制策略仿真分析及实验验证。首先利用AMESim和Simulink软件平台建立了液压系统联合仿真模型,分析了不同比例阀控制信号补偿策略下异构双阀电液伺服系统的跟踪性能。然后对比仿真了SAC-ARC与PID、ARC及RBF-ARC控制策略在多种复合信号及系统受到内外扰动等复杂工况下的跟踪误差,以验证其跟踪性能与鲁棒性。最后在搭建的实验平台上进行了实验验证。仿真与实验结果表明:SAC-ARC控制策略在各工况下均表现出优异的跟踪性能,其最大瞬态误差和累计跟踪误差均显著低于其他对比控制策略,验证了该控制策略在异构双阀电液伺服系统中的有效性与优越性。

关键词:电液伺服系统;双阀并联控制;流量分配;联合仿真

中图分类号:TP273

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.02.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Simulation and Experimental on Coordination Control of Dual-Valve Electrohydraulic Servo Systems Based on Integration of Reinforcement Learning and Adaptive Robust Control Algorithm

SU Shijie^{1*} CHENG Yongqin¹ HU Yi^{1,2} HE Jianhui¹ YANG Shuji¹

1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu, 212003

2. Aerosun Co., Ltd., Nanjing, 211100

Abstract: To enhance the control performance of a dual-valve electro-hydraulic servo system, this study conducts simulation analysis and experimental validation on a proposed coordinated control strategy, SAC-ARC, which integrates reinforcement learning with adaptive robust control. First, a co-simulation model of the hydraulic system was established using the AMESim and Simulink software platforms, and the tracking performance of the dual-valve electro-hydraulic servo system was analyzed under various proportional valve control signal compensation strategies. Subsequently, comparative simulations were performed to evaluate the tracking performance and robustness of the SAC-ARC strategy. The tracking errors of SAC-ARC were compared with those of PID, ARC, and RBF-ARC control strategies under complex working conditions, including various composite signals and the presence of internal and external disturbances. Finally, experimental validation was carried out on an established test platform. The simulation and experimental results demonstrate that the SAC-ARC control strategy exhibits superior tracking performance under all tested working conditions. Its maximum transient error and cumulative tracking error are both significantly lower than those of the comparative control strategies, thus validating the effectiveness and superiority of the proposed strategy for the dual-valve electro-hydraulic servo system.

Key words: electrohydraulic servo system; dual-valve parallel control; flow allocation; co-simulation

0 引言

为满足当前高端工程装备对大流量、高精度

及高动态性能电液伺服系统的需求,如何提升电液伺服系统的输出流量与控制精度逐渐成为该领域的研究热点^[1-5]。然而,高流量电液伺服阀由于成本高、结构复杂及可靠性不足等问题,在工程应用中受到较大限制。与此同时,仅依赖单一比例阀的电液伺服系统则不能兼顾流量输出与控制精

收稿日期:2024-09-10

基金项目:江苏省高等学校基础学科研究重大资助项目(23KJA40005);浙江省舟山市级应用技术研究项目(2025C31001)

度要求,难以满足复杂工况下的高性能控制需求^[6-9]。

近年来,有学者提出将比例阀的大流量特性与伺服阀的高精度控制能力相结合,构建双阀电液伺服系统,并围绕该系统开展了相应的控制策略研究^[10]。SU等^[11]通过建立双阀电液伺服系统模型,设计自适应鲁棒控制策略对系统不确定参数进行在线估计,结果表明该控制策略可提高系统的跟踪定位性能。WANG等^[12]针对双阀液压系统的故障特性建立了系统模型,并提出自适应鲁棒容错控制器以处理系统非线性与故障问题,实验结果验证了该方法在实现高精度控制的同时具备较好的系统安全性。SU等^[13]将PID算法与多变量预测控制算法相结合应用于双阀液压系统控制中,结果表明该控制策略较传统PID算法能够有效地提高电液伺服系统的动态响应性能和控制精度。

在前期工作中,笔者已设计了一种由比例阀与伺服阀并联组成的异构双阀电液伺服系统结构,并提出了基于SAC(soft actor-critic)与ARC(adaptive robust control)算法相结合的异构双阀协调控制策略SAC-ARC^[1]。在此基础上,本文进一步开展SAC-ARC控制策略的仿真分析与实验验证,以系统评估其在各种复杂工况下的动态性能、跟踪精度及鲁棒性,为异构双阀电液伺服系统的工程应用提供仿真与实验支撑。

1 异构双阀电液伺服系统建模

1.1 系统模型的构建

如图1所示,所构建的异构双阀电液伺服系统由比例阀与伺服阀并联组成,以兼顾系统的大流量输出能力与高精度控制性能。上层控制采用SAC算法,根据电液伺服系统的当前运行状态输出动作 a_t ,实现对下层ARC算法控制超参数的在线动态调节。ARC算法根据调节后的参数实时计算出系统当前所需总流量 Q_y ,并通过设计的流量分配策略将总流量分配给比例阀和伺服阀,从而输出相应的阀控信号。该控制策略不仅有效降低了双阀工作切换过程中时产生的瞬态误差,而且显著提升了系统的动态响应性能与位置跟踪精度。

1.2 仿真模型的构建

本文使用AMESim和Simulink软件联合搭建(图2),在AMESim中搭建图2a所示的液压系统仿真模型,主要由液压缸、伺服阀、比例阀、位移

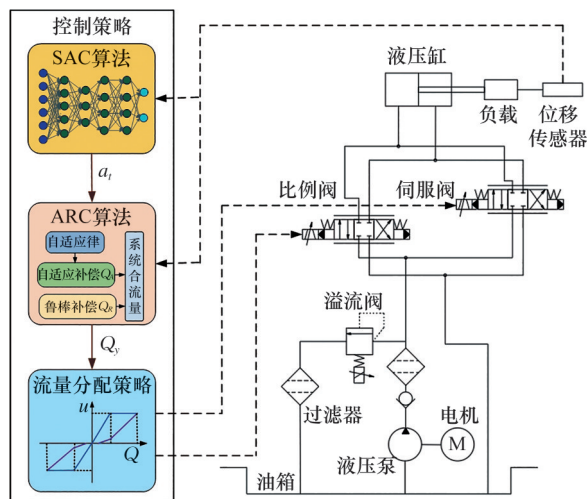


图1 异构双阀协调控制系统控制模型

Fig.1 The control model of dual-valve electro-hydraulic servo system

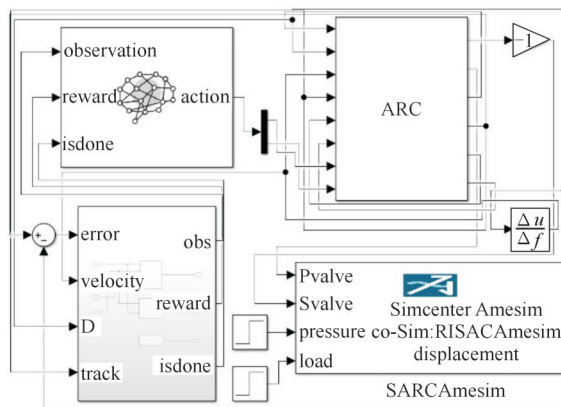
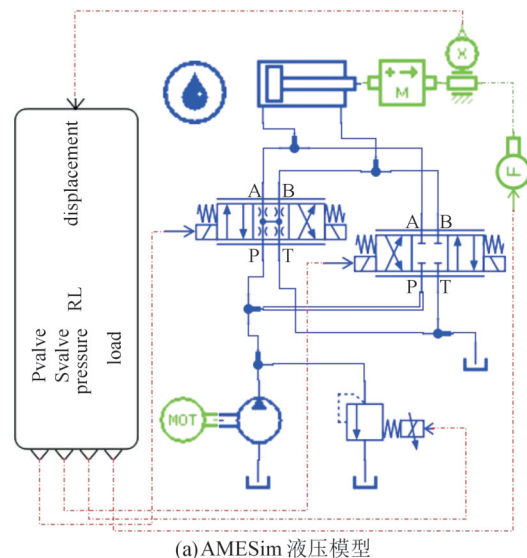


图2 联合仿真模型

Fig.2 The co-simulation model

传感器、液压泵、溢流阀等元件组成。图2b所示为SAC-ARC控制策略(SARC)仿真模型,主要由强化学习控制策略、ARC控制策略、联合仿真模型(SARCAMESIM)等组成。AMESIM模型

对应的参数设置见表1,强化学习SAC网络相关参数设置见表2。

表1 联合仿真参数

Tab.1 Co-simulation parameters

参数	数值
液压泵的排量/(mL·r ⁻¹)	10
电机的转速/(r·min ⁻¹)	1440
活塞行程/m	0.2
活塞杆直径/m	0.05
活塞直径/m	0.1
溢流阀的启动压力/MPa	14
负载质量/kg	100
比例阀的死区/%	15
比例阀的额定压降/MPa	7
比例阀的最大流量/(L·min ⁻¹)	12
比例阀的响应频率/Hz	15
伺服阀的额定压降/MPa	7
伺服阀的最大流量/(L·min ⁻¹)	4
伺服阀的响应频率/Hz	60

表2 SAC网络训练超参数

Tab.2 Training hyperparameters of SAC network

参数	数值
激活函数	ReLU
学习率(λ _Q 和λ _π)	0.001
衰减因子(γ)	0.99
记忆缓冲区的数量	1 × 10 ⁶
隐藏层的单元数(所有网络)	128
隐藏层数目	3

在后续的仿真实验中,PID、ARC、RARC和SARC分别表示应用于被控系统的控制策略分别为传统的PID控制、ARC控制、基于径向基神经网络的自适应鲁棒控制(RBF-ARC)以及SAC-ARC控制。

1.3 对比实验的参数更新方式

本文选择融合RBF神经网络与ARC算法的RBF-ARC控制作为对比控制策略,并定义其输入与输出向量与SAC网络一致^[14-15]。RBF神经网络通过梯度下降的方式不断地调整ARC算法控制超参数 k_v 和 k_s :

$$\Delta k_v = -\eta_1 \frac{\partial E}{\partial k_v} = -\eta_1 \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_v} = \eta_1 e(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} (2e(t) - e(t-1)) \quad (1)$$

$$\Delta k_s = -\eta_2 \frac{\partial E}{\partial k_s} = -\eta_2 \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_s} = \eta_2 e(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} (2e(t) - e(t-1)) \quad (2)$$

式中: e 为系统的跟踪误差; E 为神经网络的整定指标;分别采用学习率 η_1 、 η_2 对增量系数 Δk_v 和 Δk_s 进行调整。

控制参数 K_v 和 K_s 的更新公式如下:

$$K_v = k_v + \Delta k_v \quad (3)$$

$$K_s = k_s + \Delta k_s \quad (4)$$

1.4 训练样本设计

为提升SAC-ARC算法的性能与适用性,本文设计了不同类型的训练样本(表3)。其中,复合信号训练样本持续的时间为5s,其他均为4s。为增强SAC-ARC算法的鲁棒性,本文设计了带有外部负载突变(5~15kN)和系统压力突变(4~7MPa)的阶梯信号训练样本。为提升算法的适应性,本文还设计了包括复合斜坡信号、阶梯信号、方波信号以及时变正弦信号在内的多种训练样本。

表3 训练样本设计

Tab.3 Training sample set

样本分类	样本模型
复合信号 S_0	$y = \begin{cases} 6t & t \leq 1 \\ 6 & 1 < t \leq 2 \\ 6\sin(\pi t + \pi/2) & 2 < t \leq 3.5 \\ 6\sin(1.5\pi t + 7\pi/4) & 3.5 < t \leq 4.5 \\ -6 & t > 4.5 \end{cases}$
内部扰动 P 与外部负载 F 变化	$y = \{10 \text{ mm/s(滑块速度)}, 2 \text{ s(周期)}, 10 \text{ mm(振幅)}\}$ $F = \begin{cases} 0 & t \leq t_1 \\ Z_1 & t > t_1 \end{cases}$ $Z_1 \in (5, 15), t_1 \in (1, 3.5)$ $P = \begin{cases} 14 & t \notin (t_2, t_2 + 0.1) \\ Z_2 & t \in (t_2, t_2 + 0.1) \end{cases}$ $Z_2 \in (4, 7), t_2 \in (1, 3.5)$
复合斜坡信号 S_1	$y = \begin{cases} 0 & t < 0.5 \\ at - 0.5a & 0.5 \leq t < 1.5 \\ a & 1.5 \leq t < 2.5a \in [3, 8] \\ -at + 3.5a & 2.5 \leq t < 3.5 \\ 0 & t \geq 3.5 \end{cases}$
阶梯信号 S_2	$y = \{10 \text{ mm/s(滑块速度)}, 2 \text{ s(周期)}, k \text{ mm(振幅)}\}, k \in [5, 10]$
方波信号 S_3	$y = \begin{cases} k & t < 1 \\ 0 & 1 \leq t < 2 \\ k & 2 \leq t < 3 \\ 0 & t \geq 3 \end{cases}$ $k \in [2, 6], k \in \mathbb{N}$
时变正弦信号 S_4	$y = a \sin(b\pi t)(1 - 10e^3), a \in [2, 6], b \in [0.5, 1.5]$

2 仿真与结果分析

2.1 不同补偿模式异构双阀流量分配策略

针对文献[1]中的式(32),选取5组不同的比例阀控制信号补偿策略 $G_0 \sim G_4$ (图3),其比例阀控制信号的开始补偿起始流量 Q_{open} 分别为 Q_{Smax} 、 $3Q_{\text{Smax}}/4$ 、 $Q_{\text{Smax}}/2$ 、 $Q_{\text{Smax}}/4$ 、0。根据液压系统的参数设置(表1), $u_{\text{Smax}} = 10$ 、 $Z_{u_{\text{Pmax}}} = 2$ 、 $Q_{\text{Smax}} = 4$ 。所选取的ARC控制算法的控制参数为: $K_v = 140$, $K_s = 0.38$ 。

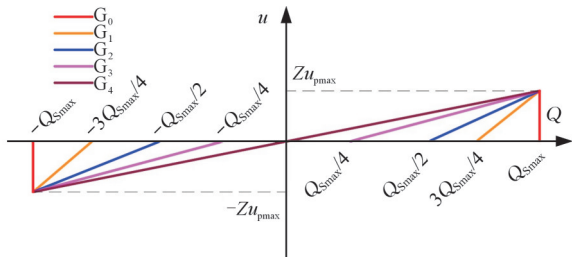


图3 不同补偿策略下的比例阀控制信号

Fig.3 Proportional valve control signals with different compensation strategies

如图4所示,当系统从单伺服阀工作切换到双阀同时工作时(1.1~1.3 s),相比没有补偿流量时(策略 G_0),补偿策略 $G_1\sim G_4$ 均能减小切换时产生的瞬态误差。不同补偿策略下的最大瞬态误差如图5所示,相比策略 G_0 ,策略 $G_1\sim G_4$ 的最大瞬态误差分别减小25.8%、29.5%、31.1%和32.8%,通过 G_4 的补偿方式的比例阀输入信号能有效地减少系统出现阶跃性的变化。

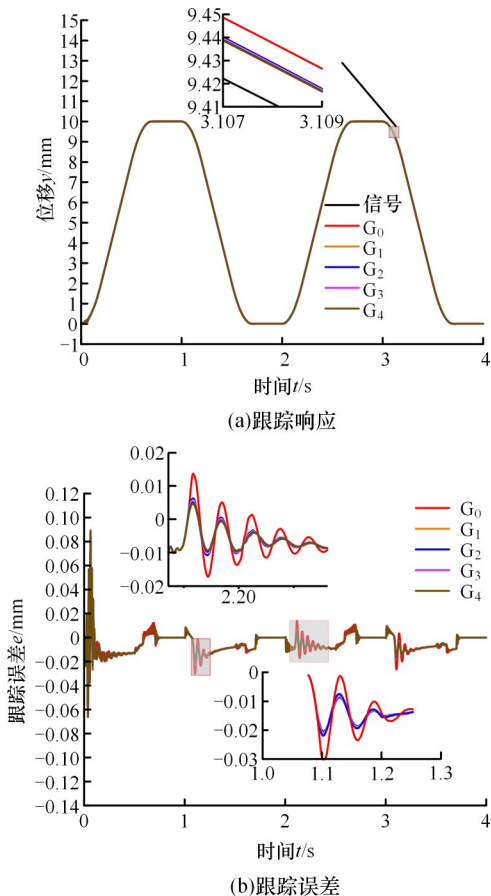


图4 比例阀在不同控制信号补偿策略下的响应与误差
Fig.4 Responses and tracking errors of the proportional valve under different control signal compensation strategies

2.2 复合信号跟踪响应

选取复合信号 S_0 进行跟踪测试,并分析被控系统在不同控制策略下的控制性能。选取的PID

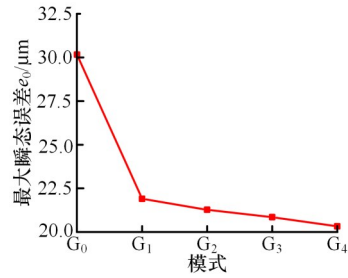


图5 比例阀在不同控制信号补偿策略下的最大跟踪误差

Fig.5 Maximum tracking error of the proportional valve under different control signal compensation strategies

控制参数如下:伺服阀 $K_P=18, K_I=12, K_D=0.01$,比例阀 $K_P=6, K_I=10, K_D=0.01$;选取ARC算法的控制参数为 $K_V=140, K_S=0.38$ 。强化学习的训练过程如图6所示,大致在第150回合后,训练过程收敛。

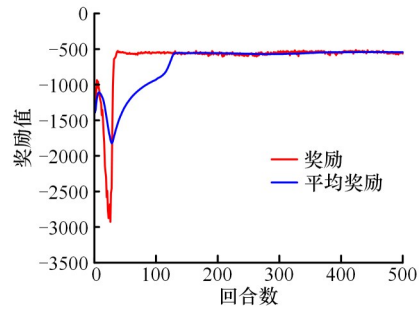
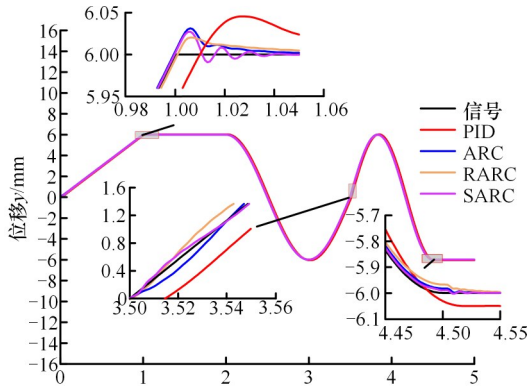


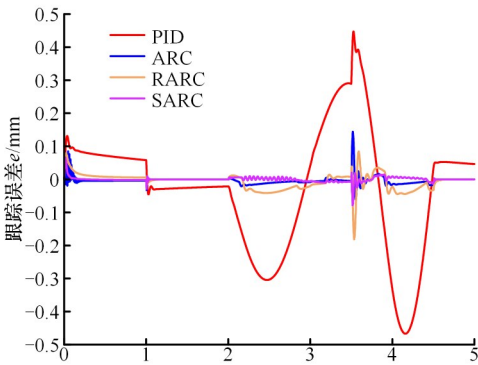
图6 SAC-ARC控制策略的训练过程
Fig.6 The training process of the SAC-ARC control strategy

不同控制策略下系统在复合信号 S_0 的跟踪响应与跟踪误差如图7所示。在整个仿真周期中,PID控制策略都产生了最大的相位滞后误差。当液压缸从正向运动转入停止时(0.98~1.02 s),相比其他控制策略,SAC-ARC所产生的超调量最小,并能快速收敛到目标值。当系统目标跟踪信号发生改变时(3.50~3.53 s),具有强大参数调节能力的SAC-ARC控制策略产生的瞬态误差较小,且比其他控制策略更好地实现了快速收敛。

在跟踪复合信号过程中,RBF-ARC和SAC-ARC的控制参数变化如图8所示,其中RKV、RKS、SKV和SKS分别表示RBF-ARC和SAC-ARC控制策略中的控制参数 K_V 和 K_S 。可以看出,由于RBF神经网络结构简单,不能有效地学习异构双阀电液伺服系统的复杂的非线性特性,使得控制参数RKV和RKS的变化较为平缓,进而降低了系统的跟踪性能。结合图7、图8可以看

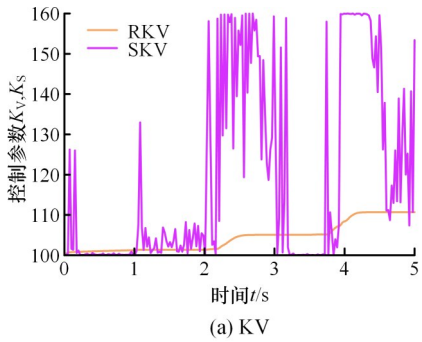


(a) 跟踪响应

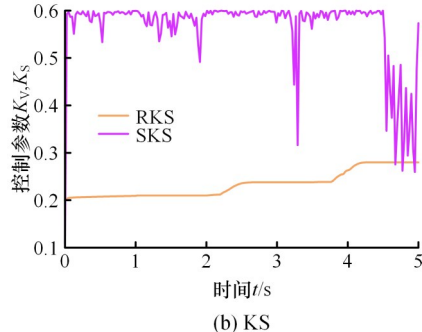


(b) 跟踪误差

图7 不同控制策略在跟踪复合信号时的响应与误差
Fig.7 Responses and tracking errors of the composite signal input for various control strategies



(a) KV



(b) KS

图8 RBF-ARC和SAC-ARC控制策略在跟踪复合信号时的ARC控制参数

Fig.8 ARC parameters of RBF-ARC and SAC-ARC control strategies when tracking composite signals

出,当液压缸平稳运动或停止时,影响系统快速性的SKV值会自动减少,反之当运动速度变化剧烈

时,SKV值则快速增大;当目标跟踪信号切换时,影响系统鲁棒性的SKS值会适当减小以促进瞬态跟踪误差的快速收敛,除此之外,SKS值均处于较高的状态以增强系统的稳定性。

图9所示为不同控制策略所产生的累计误差,相比PID、ARC及RBF-ARC控制策略,SAC-ARC控制策略的累计误差分别减小97.2%、44.7%和76.4%,表明SAC-ARC控制策略具有最优的性能。

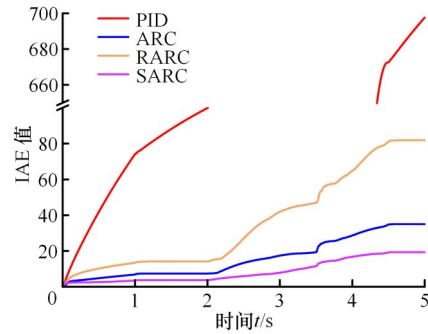


图9 不同控制策略在跟踪复合信号时的IAE误差

Fig.9 The IAE value of the composite signal input for various control strategies

2.3 随机内外扰动下的跟踪响应

为分析SAC-ARC控制策略在系统存在内部压力扰动和外部负载突变时的性能,选取的目标跟踪信号为阶梯信号(滑块速度10 mm/s,周期2 s,振幅10 mm),共有6种工况($W_1 \sim W_6$)。各工况受到的内外扰动见表4,其中 P 为内部压力从初始工作压力(14 MPa)下降至给定压力, t_1 为压力扰动出现的时间, Z 为突然施加的外部负载, t_2 为负载施加的时间。伺服阀、比例阀的PID参数如下: $K_p = 18, K_i = 12, K_D = 0.01, K_p = 6, K_i = 10, K_D = 0.01$;ARC算法控制参数为: $K_v = 140, K_s = 0.38$ 。

表4 随机扰动工况参数取值

Tab.4 Parameter values of randomly disturbance conditions

工况/参数	P/MPa	t_1/s	Z/kN	t_2/s
W_1	6	1.2	10	2.4
W_2	6	1.2	15	3.4
W_3	5	2.2	5	1.4
W_4	5	2.2	15	3.4
W_5	4	3.2	5	1.4
W_6	4	3.2	10	2.4

图10所示为工况 W_6 的系统跟踪响应与误差,可以看出当出现10 kN的外部负载扰动时,SAC-ARC控制策略由于具有较强的参数调节能力,能快速抑制振荡,且产生的最大瞬态误差比

PID、ARC 及 RBF-ARC 控制策略分别减小 46.3%、37.0% 和 25.4%。当系统压力突变时，SAC-ARC 控制策略的系统产生抖动后，能快速恢复稳定状态。

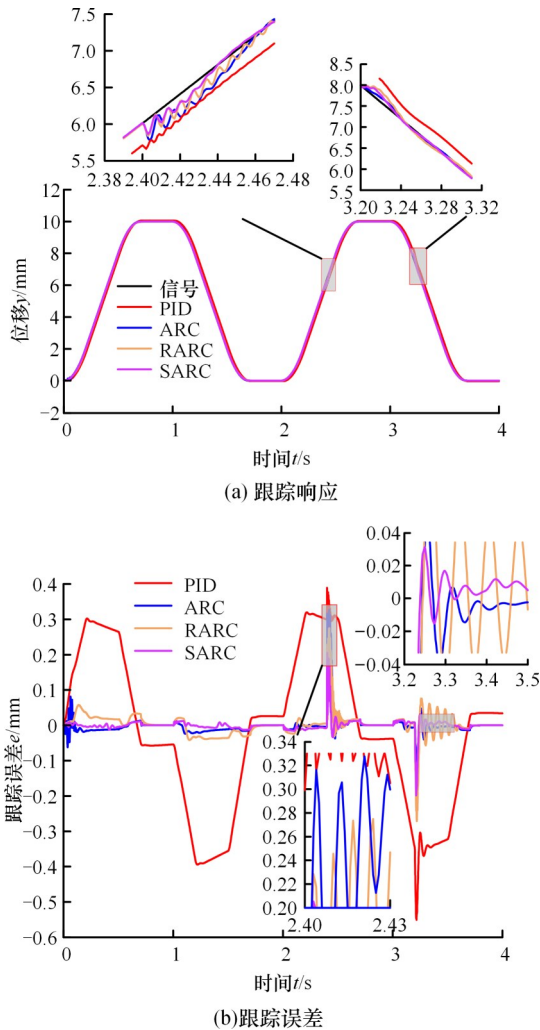


图 10 不同控制策略在扰动工况 W_6 下的响应与误差
 Fig.10 Responses and tracking errors of the disturbance condition (W_6) for various control strategies

相比 PID、ARC 和 RBF-ARC 策略，SAC-ARC 控制策略的积分绝对误差 (integral absolute error, IAE) 值至少分别减小 96.1%、62.1% 和 33.0%，见表 5。

2.4 不确定性信号跟踪响应

分别选取复合斜坡信号、阶梯信号、方波信号和时变正弦信号进行跟踪测试，分析被控系统在不同控制策略下的跟踪性能。不确定性信号选取如下：对于复合斜坡信号 1 和 2，随机参数 a 分别取 5 和 8；对于阶梯信号 1 和 2，随机参数 k 分别取 5 和 10；对于方波信号 1 和 2，随机参数 a 分别取 3 和 5；对于时变正弦信号 1 和 2，随机参数 a 和 b 分别取 4、1.5 和 6.10。所采用的控制参数如下：

表 5 不同控制策略在各种扰动工况下的 IAE 值
 Tab.5 IAE values of the stair-step signal input under different disturbance conditions for various control strategies

工况/控制策略	PID	ARC	RBF-ARC	SAC-ARC
W_1	705.4	41.4	57.2	24.6
W_2	702.7	44.1	60.8	24.9
W_3	706.5	42.8	64.9	19.6
W_4	702.4	51.2	73.5	24.0
W_5	707.3	35.8	68.6	22.8
W_6	705.8	44.4	73.1	27.7

伺服阀 PID 参数 $K_p = 18, K_i = 12, K_d = 0.01$ 、比例阀 PID 参数 $K_p = 6, K_i = 10, K_d = 0.01$ ，ARC 控制参数 $K_v = 140, K_s = 0.38$ 。

不同控制策略在跟踪复合斜坡信号 1 时的跟踪响应与跟踪误差如图 11 所示。当被控液压缸活塞杆由停止转入正向运动时 (0.5~0.7 s)，所有的控制策略均会有一定的瞬态误差，但相比 PID、ARC 及 RBF-ARC 控制策略，SAC-ARC 控制策略产生的最大瞬态误差分别减小 71.2%、62.7% 和 25.5%。当被控液压缸活塞杆由正向运动转入停止时 (1.49~1.53 s)，所有控制策略都产生一定的超调，相比其他控制策略，系统在 SAC-ARC 控制策略下能够实现跟踪误差快速收敛。

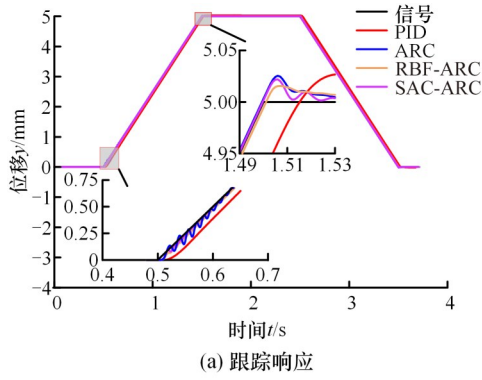
与跟踪复合斜坡信号类似，当跟踪阶梯信号 (图 12) 与时变正弦信号 (图 13) 时，除了 PID 控制策略会产生较大的跟踪误差外，ARC、RBF-ARC 及 SAC-ARC 控制策略均具有较好的跟踪性能。但当被控液压缸活塞杆的运动状态发生改变时 (图 12 中 1.66~1.72 s、图 13 中 1.46~1.54 s)，SAC-ARC 控制策略通过动态调节 ARC 控制参数 K_v 和 K_s ，进而增强了系统的跟踪性能，故产生的跟踪误差较小。

当跟踪方波信号 (图 14) 时，由于被控伺服阀、比例阀本身的性能限制，故 ARC、RBF-ARC 及 SAC-ARC 控制策略均在目标跟踪信号突变时产生了较大的跟踪误差。但 SAC-ARC 控制策略依然表现出最好的性能，能无超调地以最短时间驱动被控液压缸活塞杆达到目标值。

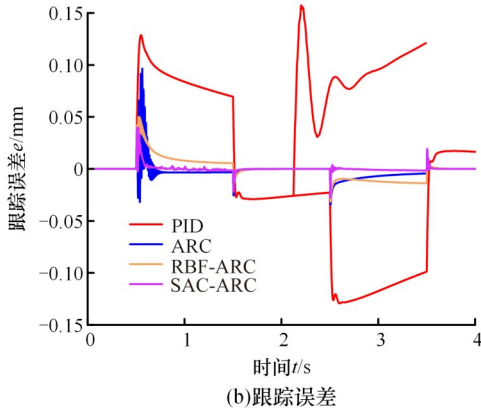
不同控制策略跟踪上述 10 种不确定信号的 IAE 值见表 6。可以看出在各种工况下，本文 SAC-ARC 控制策略均具有最小的跟踪误差。

3 实验验证

异构双阀协调控制系统实验平台如图 15 所示，主要由工控机、控制柜、液压站及实验平台组



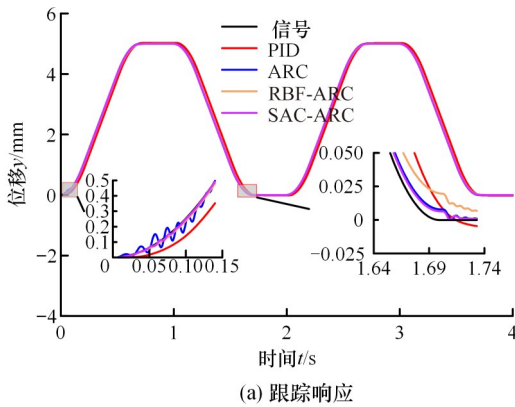
(a) 跟踪响应



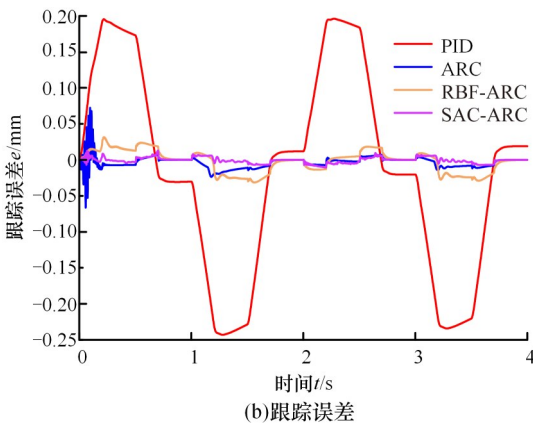
(b) 跟踪误差

图 11 不同控制策略在跟踪复合斜坡信号 1 时的响应与误差

Fig.11 Responses and tracking errors of composite ramp signal 1 for various control strategies



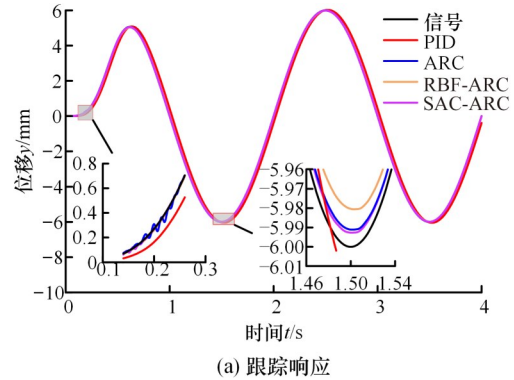
(a) 跟踪响应



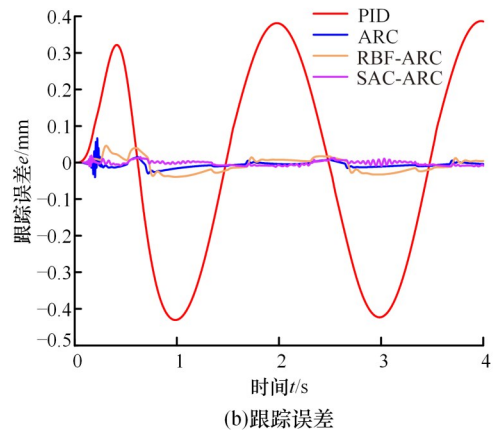
(b) 跟踪误差

图 12 不同控制策略在跟踪阶梯信号 1 时的响应与误差

Fig.12 Responses and tracking errors of stair-step signal 1 input for various control strategies



(a) 跟踪响应



(b) 跟踪误差

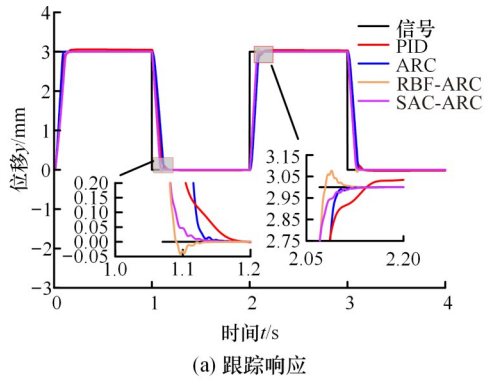
图 13 不同控制策略在跟踪时变正弦信号 1 时的响应与误差

Fig.13 Responses and tracking errors of the time-varying sinusoidal signals input for various control strategies

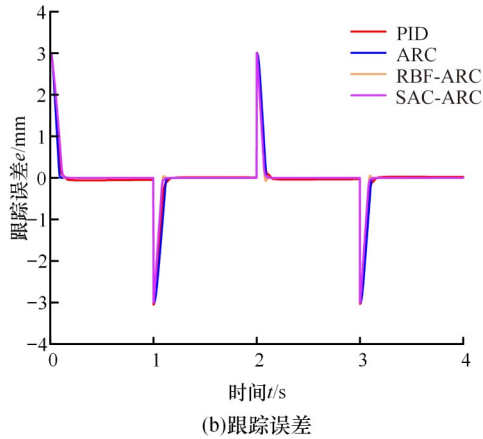
成。各种控制策略均由 Simulink Desktop Real-Time 平台实现,并通过安装在工控机内的多功能数据采集卡(NI PCIe-6321)控制伺服阀(ATOS DLHZO-TE-040-L01)和比例阀(ATOS DHZE-A-071-L3)的工作,最终实现对安装在实验平台中的液压缸的驱动。伺服阀、比例阀等各种液压元件的参数均与表 1 中给出的参数一致。

为验证 SAC-ARC 控制策略在真实环境下的控制性能,选取表 3 中复合信号 S_0 进行跟踪实验,所采用的 ARC 控制策略的控制参数为 $K_V = 140$, $K_S = 0.38$ 。不同控制策略的跟踪响应与跟踪误差如图 16 所示,可以看出当活塞杆由正向运动转为停止时(0.98~1.06 s),SAC-ARC 控制策略具有最小的跟踪误差和较小的超调量;当目标跟踪信号发生变化时(3.45~3.55 s),SAC-ARC 控制策略同样具有最高的跟踪精度。

不同控制策略在跟踪复合信号 S_0 的累计误差如图 17 所示。当选用合适的控制参数 K_V 和 K_S 时,ARC 控制策略能产生较小的累计误差,但当目标跟踪信号发生改变时,其跟踪误差也会逐渐增大。而本文 SAC-ARC 控制策略由于



(a) 跟踪响应



(b) 跟踪误差

图 14 不同控制策略在跟踪方波信号 1 时的响应与误差
Fig.14 Responses and tracking errors of square signals input for various control methods

表 6 不同控制策略在跟踪不同输入信号时的 IAE 值
Tab 6 The IAE value of the different signal inputs for various control strategies

输入信号	控制策略	信号 1	信号 2
复合斜坡信号	PID	235.7	373.7
	ARC	15.8	17.7
	RBF-ARC	25.2	31.0
	SAC-ARC	4.1	8.8
阶梯信号	PID	445.3	888.7
	ARC	23.5	31.6
	RBF-ARC	48.1	61.1
	SAC-ARC	12.2	19.7
时变正弦信号	PID	937.6	983.2
	ARC	38.9	32.9
	RBF-ARC	85.6	72.4
	SAC-ARC	24.7	21.3
方波信号	PID	803.6	1954.5
	ARC	742.8	1776.6
	RBF-ARC	615.4	1589.6
	SAC-ARC	609.9	1570.5

具有强大的参数自调节能力,能随着目标跟踪信号的变化动态地调整 ARC 控制参数 K_v 和 K_s ,从而有效地减小了系统的跟踪误差,提高了控制精度。

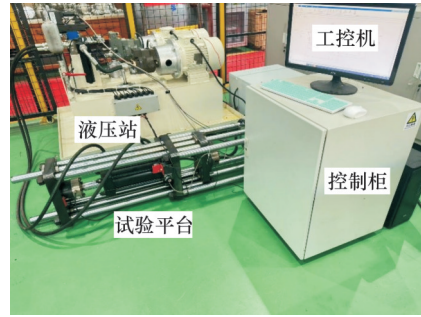
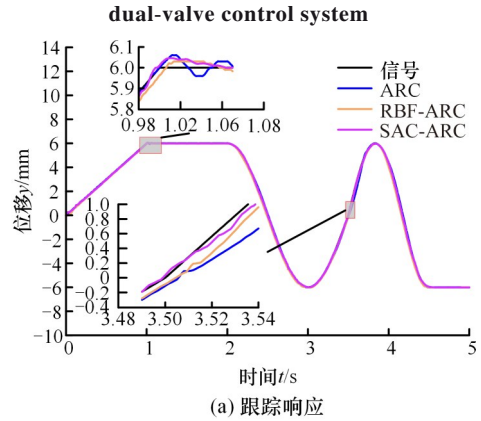
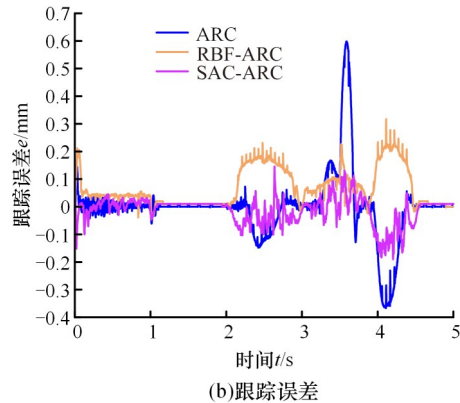


图 15 异构双阀协调控制系统实验平台

Fig.15 The experimental platform of heterogeneous dual-valve control system



(a) 跟踪响应



(b) 跟踪误差

图 16 不同控制策略在跟踪复合信号 S_0 时的响应与误差

Fig.16 Responses and tracking errors of composite signal S_0 input for various control strategies

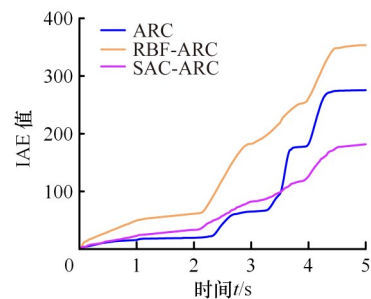


图 17 不同控制策略在跟踪复合信号 S_0 时的 IAE 值
Fig.17 The IAE value of composite signal S_0 input for various control strategies

4 结论

1) 本文在异构双阀电液伺服系统 SAC-ARC

控制策略的基础上建立了 AMESIM-Simulink 联合仿真模型,设计了包括复合斜坡信号、阶梯信号、方波信号以及时变正弦信号在内的多种训练样本以提升算法的鲁棒性,进一步分析了不同比例阀控制信号补偿策略下系统的跟踪响应性能。

2) 仿真与实验结果表明,所提的 SAC-ARC 控制策略的性能优于 PID、ARC 及 RBF-ARC 等控制策略。当跟踪复合信号时,相比 PID、ARC 及 RBF-ARC 控制策略,SAC-ARC 控制策略的累计误差分别减小 97.2%、44.7% 和 76.4%;当系统受到内外扰动时,SAC-ARC 策略产生的最大瞬态误差分别至少减小 46.3%、37.0% 及 25.4%,而累计跟踪误差则至少减小 96.1%、62.1% 及 33.0%。

3) 与同样具有参数调节能力的 RBF-ARC 控制策略的对比结果表明,RBF 神经网络不能有效地学习异构双阀协调控制电液伺服系统在不同工况下的动态非线性特性,而 SAC-ARC 控制策略则具有更强的学习能力,能更有效地对底层 ARC 算法控制参数的动态调节,从而有效地减小异构双阀并联控制系统的总体跟踪误差,提高了系统的控制精度与鲁棒性。

参考文献:

- [1] 苏世杰,程泳钦,胡毅,等. 基于强化学习自适应鲁棒控制的异构双阀协调控制策略研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(10): 2335-2342.
SU Shijie, CHENG Yongqin, HU Yi, et al. Coordination Control of Dual-Valve Electrohydraulic Servo Systems Based on Integration of Reinforcement Learning and Adaptive Robust Control [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(10): 2335-2342.
- [2] LYU Litong, CHEN Zheng, YAO Bin, et al. Development of Parallel-connected Pump-valve-coordinated Control Unit with Improved Performance and Efficiency [J]. Mechatronics, 2020, 70: 102419.
- [3] LIU Yi, WANG Tao, GONG Guofang, et al. Present Status and Prospect of High-frequency Electro-hydraulic Vibration Control Technology [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(1): 93.
- [4] QUAN Zhongyi, QUAN Long, ZHANG Jinman. Review of Energy Efficient Direct Pump Controlled Cylinder Electro-hydraulic Technology [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 35: 336-346.
- [5] YU Huan, CHEN Ying, SHI Wenzhao, et al. State Constrained Variable Structure Control for Active Heave Compensators [J]. IEEE Access, 2019, 7: 54770-54779.
- [6] XU Bing, DING Ruqi, ZHANG Junhui, et al. Modeling and Dynamic Characteristics Analysis on a Three-stage fast-response and Large-flow Directional Valve [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 79: 187-199.
- [7] YU Shaojuan, SONG Junjun. Iterative Learning Control of Double Servo Valve Controlled Electro Hydraulic Servo System [C] // 2011 Seventh International Conference on Computational Intelligence and Security. IEEE, 2011: 278-282.
- [8] HE Jianhui, SU Shijie, WANG Hairong, et al. Online PID Tuning Strategy for Hydraulic Servo Control Systems via SAC-based Deep Reinforcement Learning [J]. Machines, 2023, 11(6): 593.
- [9] 姚静,寇成浩,尹钰鑫,等. 超高压大流量比例插装阀测试方法[J]. 中国机械工程, 2020, 31(6): 638-646.
YAO Jing, KOU Chenghao, YIN Yuxin, et al. Test Methods of Ultra-high Pressure and Large Flow Proportional Cartridge Valves [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(6): 638-646.
- [10] BAI Yanhong, QUAN Long. Improving electro-hydraulic System Performance by double-valve Actuation [J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2016, 40(3): 289-301.
- [11] SU Shijie, XUE Ting, CHEN Yun, et al. Harmonic Control of a Dual-valve Hydraulic Servo System with Dynamically Allocated Flows [J]. Asian Journal of Control, 2023, 25(3): 1939-1956.
- [12] WANG Tianzhu, ZHANG Qiang, FANG Jinhui, et al. Active Fault-tolerant Control for the Dual-valve Hydraulic System with Unknown Dead-zone [J]. ISA Transactions, 2024, 145: 399-411.
- [13] SU Shijie, ZHU Yuanyuan, LI Cunjun, et al. Dual-valve Parallel Prediction Control for an Electro-hydraulic Servo System [J]. Science Progress, 2020, 103(1): 0036850419875662.
- [14] WANG Bowen. Research on Nonlinear Calibration of Mine Catalytic-combustion-based Combustible-gas Sensor Based on RBF Neural Network [J]. Heliyon, 2023, 9(3): e14055.
- [15] 陈志勇,李攀,叶明旭,等. 自动驾驶电动车辆基于参数预测的径向基函数神经网络自适应控制[J]. 中国机械工程, 2024, 35(6): 982-992.
CHEN Zhiyong, LI Pan, YE Mingxu, et al. RBF Neural Network Adaptive Control Based on Parameter Prediction for Self-driving Electric Vehicles [J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(6): 982-992.

(编辑 陈勇)

作者简介: 苏世杰(通信作者),男,1981年生,教授、博士。研究方向为电液伺服控制、智能控制以及仿生机械设计等。E-mail: sushijie@just.edu.cn.

本文引用格式:

苏世杰,程泳钦,胡毅,等. 融合强化学习自适应鲁棒控制算法的异构双阀协调控制策略仿真及实验[J]. 中国机械工程, 2026, 37(2): 295-303.

SU Shijie, CHENG Yongqin, HU Yi, et al. Simulation and Experimental on Coordination Control of Dual-Valve Electrohydraulic Servo Systems Based on Integration of Reinforcement Learning and Adaptive Robust Control Algorithm [J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(2): 295-303.