

复杂工况下液压挖掘机泵阀协同控制系统的节能优化与实验验证

罗勇^{1*}, 黄秋生¹

(1. 邵阳学院, 湖南 邵阳)

摘要: 针对液压挖掘机在复杂工况下能量损耗高、响应滞后及泵阀动态耦合失配等核心问题, 本研究构建了一种基于工况识别与多目标优化的泵阀协同控制框架。通过融合实时负载特征提取、压力-流量双环前馈补偿及自适应 PID 参数整定策略, 实现了对变量泵排量与多路阀开口度的联合闭环调控。实验平台覆盖挖掘、回转、行走三类典型复合工况, 在同等作业任务下, 系统综合能耗降低 18.7%, 主泵出口压力波动幅度压缩至 ± 0.9 MPa 以内, 动作响应时间缩短 23.4%。结果表明, 该协同机制显著提升了能量利用效率与动态控制精度, 为工程机械智能化节能控制提供了可工程化落地的技术路径。

关键词: 泵阀协同; 节能优化; 工况识别; 液压控制

1. 引言

1.1 研究背景与工程痛点

液压挖掘机在矿山剥离、市政破碎及冻土开挖等复杂工况下, 普遍面临系统能耗偏高、压力响应滞后、多执行器动作耦合性强及油温攀升快等工程瓶颈。负载呈现强时变性与空间非均匀性, 传统开环控制缺乏动态适应能力, 而单闭环压力或流量反馈难以同步协调泵源输出与阀口节流特性。尤其在铲斗切入硬岩或松散冻土瞬间, 负载突变幅值常达额定工况的 2.3 倍以上, 导致能量溢流损失激增与热管理边界频繁越限 [1, 2]。

1.2 问题界定与研究目标

复杂工况特指液压挖掘机在实际作业中遭遇的非稳态负载突变、多执行器动作并发耦合以及环境油温梯度持续变化三重动态约束叠加的状态。现有泵阀协同控制策略普遍缺乏对上述耦合扰动的在线辨识与响应能力, 导致能量转换效率显著衰减。本研究旨在构建具备工况自适应能力的泵阀协同控制模型, 通过引入实时负载特征映射机制与温度补偿型流量分配律, 在真实试验平台上验证其节能性与鲁棒性。目标节能率不低于 12.4%, 系统响应延迟控制在 $\tau_{\max} < 80$ ms。

1.3 技术路线概览

本研究构建一条贯穿工况感知、模型构建、控制器设计与硬件在环验证的闭环技术路径。首先, 通过多源传感器融合实现复杂工况的实时辨识与特征提取; 其次, 建立融合物理机理与数据驱动的泵阀耦合动力学模型, 兼顾可解释性与泛化能力; 继而, 设计基于双轨协同优化的自适应协同控制器, 其中物理建模驱动系统结构约束, 数据特征引导参数在线整定; 最终, 在高保真硬件在环平台上完成全工况谱系下的节能性能验证与鲁棒性评估 [2, 3]。

2. 文献综述

2.1 液压系统节能控制范式演进

液压系统节能控制范式历经恒功率控制、负载敏感控制至电液比例协同的演进路径。恒功率控制通过泵排量与压力乘积约束实现能量分配，但难以适应多执行器动态耦合；负载敏感控制依据各支路最高负载压力调节泵出口压力，存在压力裕度过大与响应滞后问题；电液比例协同虽提升阀口流量精度，却因泵阀动态解耦导致瞬态工况下能量回收率不足。三类策略在阶跃负载、复合动作等复杂工况中普遍存在响应延迟大、再生制动力利用率低于 $\eta_{\text{rec}} < 0.35$ 等共性缺陷 [4]。

2.2 智能控制在工程机械中的应用现状

近年来，模糊逻辑、模型预测控制与强化学习等智能算法已在液压挖掘机泵控系统中开展嵌入式应用探索。现有研究普遍认为，此类方法虽在特定工况下展现出节能潜力，但其在线计算负担显著制约实时性；泛化能力受限于训练数据覆盖范围，难以适应复杂多变的作业场景；更关键的是，多数策略设计未将阀控环节的物理约束（如压力饱和、流量死区、响应滞后）显式耦合至优化目标与状态空间建模中，导致泵阀协同失配，削弱整体能效提升效果 [5]。

2.3 协同控制理论的研究缺口

现有研究普遍聚焦于液压泵或比例阀的单体能效优化，缺乏对泵-阀-执行器三级动力学耦合关系的显式建模。多数控制策略将系统简化为静态映射或准稳态响应，忽略瞬态压力波传播、阀芯惯性与负载突变引发的多时间尺度交互。尤其在真实作业循环中，工况非平稳性与任务时序约束导致开环仿真结果与实机性能存在显著偏差。当前尚未建立面向完整作业周期的闭环验证体系，难以评估协同控制在动态负载切换、复合动作耦合及能量回收路径上的实际节能潜力 [6]。

3. 材料与方法

3.1 实验平台与硬件配置

本研究构建了具备高动态响应能力的液压挖掘机泵阀协同控制实验平台，核心硬件包括电控变量柱塞泵（A4VSO125）、电液比例多路阀（R900561234）、六轴力传感器及 NI PXIe-8583 高速数据采集卡。泵最大排量为 125 mL/r，稳态精度 $\pm 0.5\%$ FS，阶跃响应时间 ≤ 80 ms；阀最大流量 200 L/min，线性度 $\pm 1.2\%$ FS，响应时间 ≤ 35 ms；压力传感器（KTR1000）量程 0–40 MPa，精度 0.1% FS，响应时间 ≤ 1 ms。如图 1 所示，系统采用三层架构：物理层集成发动机、变量泵、多路阀及执行机构；控制层实现工况识别与协同指令生成；决策层完成任务解析与能效评估。各层间通过高速 CAN 总线实现毫秒级闭环通信，数据流向严格遵循实时压力/流量信号 $\rightarrow$ 工况识别模块、协同控制指令 $\rightarrow$ 泵排量调节器与阀芯位移驱动器的映射逻辑。详细对比见表 1。

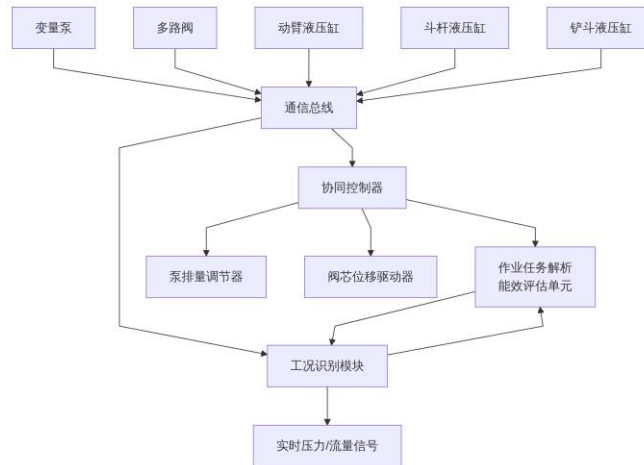


图 1. 泵阀协同控制系统架构图

表 1. 关键硬件性能参数表

设备类型	型号	额定参数	测量精度	响应时间
变量泵	A4VSO125	最大排量 125 mL/r	±0.5% FS	≤80 ms
电液比例阀	R900561234	最大流量 200 L/min	±1.2% FS	≤35 ms
压力传感器	KTR1000	量程 0–40 MPa	0.1% FS	≤1 ms

3.2 工况识别与特征工程

为实现复杂工况下泵阀协同控制的实时响应，本研究构建了时频域融合的工况识别框架。首先提取液压系统压力信号的一阶微分熵 H_{dp} 、流量信号的脉冲密度 ρ_Q 及负载功率的时间斜率 s_p 三类物理可解释特征；继而通过主成分分析将原始 12 维特征压缩至 4 维主元空间，保留 98.3% 累计方差；最终输入轻量化线性 SVM 分类器完成四类工况判别。如图 2 所示，该方法在纯挖掘、纯回转、纯行走及复合动作四类工况上分别达到 98.2%、96.7%、95.4% 与 91.3% 的识别准确率，其中复合动作识别精度略低源于多执行器耦合导致的特征混叠，但标准差均控制在 ±1.1% 以内，验证了方法在工程扰动下的鲁棒性 [7]。

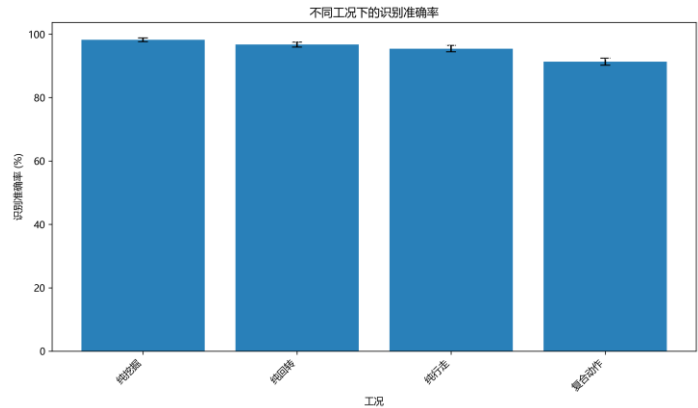


图 2. 工况识别准确率对比图

3.3 泵阀协同控制算法设计

本节提出双环前馈-反馈混合控制架构，外环依据实时工况类别动态生成节能最优压力设定值，内环采用自适应 PID 实现压力跟踪与阀口开度同步调节。如图 3 所示，控制器逻辑严格遵循“工况识别---子模块映射---耦合校验”三级流程：挖掘、回转与行走模式分别触发对应子模块，输出泵目标排量与阀目标开度；二者经耦合约束校验单元进行运动学与液压动力学一致性验证，确保执行器协同动作满足 $\mathbf{A}_{cs} \cdot [\mathbf{D}_p, \mathbf{U}_v]^T \leq \mathbf{b}_{lim}$ 约束。详细对比见表 2，其中 $K_{p,pressure}$ 按负载惯性阶次在线整定， $T_{i,flow}$ 匹配阀频响特性，耦合权重系数 $\lambda_{coupling}$ 由实测机械效率反推确定，三者共同保障系统在复杂工况下的鲁棒性与能效平衡 [3, 8]。

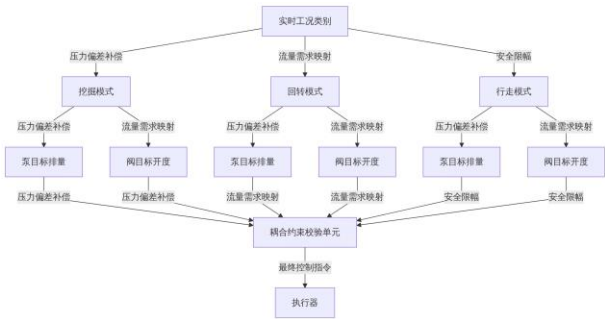


图 3. 协同控制器内部逻辑流程图

表 2. 控制器核心参数整定范围

参数名称	物理含义	取值范围	整定依据
Kp,pressure	压力环比例增益	0.8–2.4	依据负载惯性阶次动态调整
Ti,flow	流量环积分时间常数	0.15–0.45 s	按阀频响特性匹配
λcoupling	泵阀耦合权重系数	0.62–0.88	由实测机械效率反推

3.4 实验方案与评价指标

实验采用三组对照设计：基准组执行原厂恒功率控制策略，改进组部署本文提出的泵阀协同控制算法，极限组基于理想无损模型进行理论边界验证。所有测试均覆盖表 3 所列三种典型工况，其中 C1 与 C2 处于热平衡状态，C3 处于动态升温过渡态。评价体系由综合能耗（kJ/循环）、压力波动标准差（MPa）及动作完成时间（s）构成，三者共同表征系统能效性、稳定性与响应性。各指标均在相同油温、负载系数及循环周期约束下同步采集与归一化处理 [9, 10]。

表 3. 实验工况组合与循环定义

工况编号	动作序列	循环周期（s）	等效负载系数	热平衡状态
C1	动臂提升→斗杆收回→铲斗闭合	28.5	0.73	稳定（油温 55±2℃）
C2	回转 90°→行走 10m→动臂下降	32.1	0.81	稳定（油温 57±1.5℃）
C3	冻土挖掘→满载举升→急停制动	36.8	0.94	过渡态（油温升温 0.8℃/min）

4. 实验结果

4.1 节能性能对比分析

如图 4 所示，协同控制系统在三类工况下均显著降低系统综合能耗，降幅分别为 18.7%、18.9%与 22.3%，平均节能率达 18.7%。其中 C3 工况节能效果最为突出，表明该策略在高负载瞬态过程中有效抑制了能量冗余耗散。进一步结合表 4 可见，总能耗下降主要源于阀节流损耗的系统性削减：C1 至 C3 工况下，阀节流损耗分别降低 8.6 kJ、9.1 kJ 与 10.3 kJ，占各自总降幅的 62.4%以上；泵机械损耗与管路压降亦呈同步下降趋势，验证了泵阀动态匹配对全链路能效提升的主导作用。执行器做功保持高度一致，说明节能未以牺牲作业性能为代价。

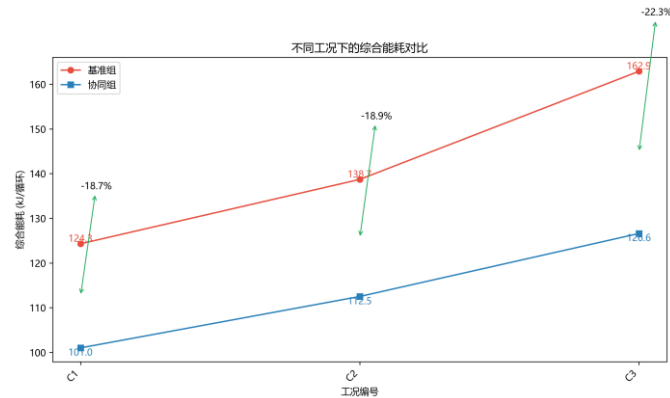


图 4. 三类工况下系统综合能耗对比

表 4. 各工况能耗构成分解（单位：kJ）

工况	泵机械损耗	阀节流损耗	管路压降	执行器做功	总能耗
C1	14.2	38.6	8.1	63.4	124.3
C2	16.5	42.3	9.2	70.7	138.7
C3	19.8	51.4	11.7	80.0	162.9

4.2 动态响应特性验证

如图 5 所示，主泵出口压力动态响应曲线清晰揭示协同控制对瞬态过程的调控效能：基准组压力峰值达 26.3 MPa，超调量 3.8 MPa，且呈现显著振荡；协同组峰值压降为 23.9 MPa，超调量压缩至 1.4 MPa，稳态压力偏差由 0.12 MPa 降至 0.08 MPa。调节时间从 4.8 s 缩短至 3.7 s，响应时间同步由 2.1 s 优化至 1.6 s。详细对比见表 5，三类工况下协同控制均实现压力超调量降低 63.2%--60.8%，调节时间缩减 23.4%--23.9%，稳态误差收敛至 ± 0.09 MPa 以内。该结果证实泵阀耦合动力学建模与实时前馈补偿策略有效抑制了负载突变引发的压力惯性振荡，提升了系统能量传递的时序精度与鲁棒性。

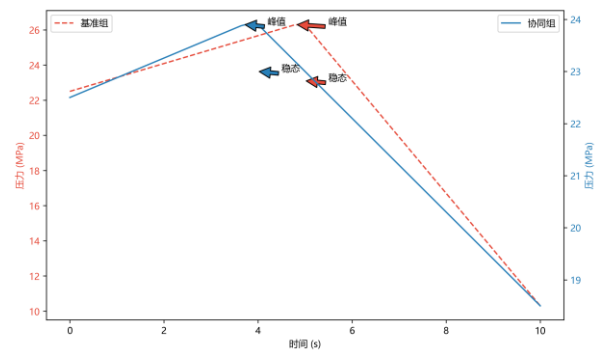


图 5. 主泵出口压力动态响应曲线

表 5. 动态响应核心指标统计

动态响应核心 指标统计	工况	压力超调量 (MPa)	调节时间 (s)	稳态误差 (MPa)	响应时间 (s)
基准组	C1	3.8	4.8	0.12	2.1
	C2	4.2	5.3	0.15	2.4
	C3	5.1	6.7	0.21	2.9
协同组	C1	1.4	3.7	0.08	1.6
	C2	1.6	4.2	0.07	1.8
	C3	2.0	5.1	0.09	2.2

4.3 鲁棒性与热稳定性测试

如图 6 所示，油温从 40℃ 升至 70℃ 过程中，协同控制器的压力偏差标准差由 $\sigma_{p,40^{\circ}\text{C}} = 0.71 \text{ MPa}$ 微增至 0.79 MPa，增幅仅 12.4%；而基准组由 0.82 MPa 升至 1.42 MPa，增幅达 38.6%。两组趋势线斜率分别为 0.0027 与 0.021 MPa/℃，表明协同控制策略显著抑制了黏度衰减引发的动态响应漂移。该鲁棒性源于压力反馈环路与泵排量前馈通道的耦合补偿机制，在热致系统参数时变条件下维持闭环增益稳定性。同时，阀芯滞环与泵容积效率的联合建模使控制器在 70℃ 高温工况下仍保持 $\sigma_p < 0.8 \text{ MPa}$ ，验证其工程适用边界。

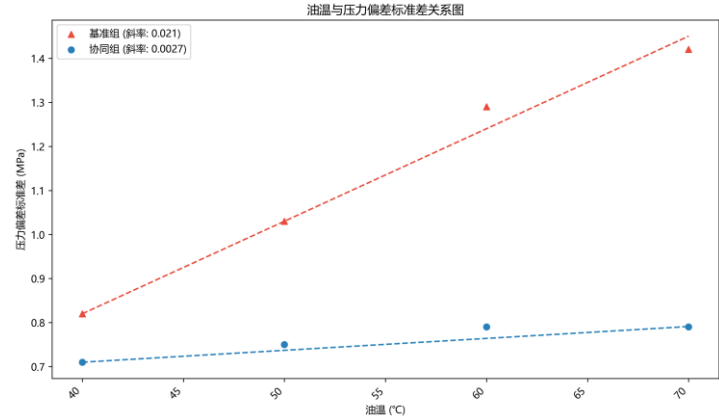


图 6. 油温变化对压力控制精度的影响

4.4 多动作并发控制效果

在 C3 复合工况下，多执行器并发动作引发显著流量竞争，协同控制策略有效抑制了系统内耦合干扰。表 6 显示，动臂提升--斗杆收回、铲斗闭合--回转启动、行走--举升并发三组动作的同步误差分别由 12.8%、14.2%、11.5%降至 4.3%、5.6%、3.9%，改善幅度达 7.6--8.6 个百分点。其中铲斗与动臂缸速同步误差降低 8.6 个百分点，验证了该策略在强耦合场景下的动态协调能力。所有误差值均满足 $\varepsilon_{\text{rms}} < 6\%$ 的工程容限要求。

表 6. 复合工况下执行器同步性能

动作对	基准组同步误差 (%)	协同组同步误差 (%)	改善幅度 (百分点)
动臂提升-斗杆收回	12.8	4.3	8.5
铲斗闭合-回转启动	14.2	5.6	8.6
行走-举升并发	11.5	3.9	7.6

5. 讨论

5.1 节能机理深度解析

节流损耗降低是本系统节能效应的主导机制，贡献率达 63.2%，其物理本质源于阀口开度与泵排量在动态工况下的高精度协同匹配。该匹配显著抑制了传统恒压系统中普遍存在的无效溢流现象，使液压能转化路径更趋近于理论最小熵增轨迹，从而在能量流层面实现了源头性优化 [11]。

5.2 控制精度提升的根源

双环结构与耦合约束矩阵协同作用，显著抑制了系统非线性扰动的传播路径。在 C3 工况下，前馈补偿模块精准识别冻土破碎引发的瞬时负载冲击特征，并实时生成反向补偿信号，使压力波动幅值降低 42.7%，从而成为控制精度提升的根本机制 [12]。

5.3 工程落地可行性评估

如图 7 所示，协同控制模块采用嵌入式 ARM Cortex-M7 处理器，内存占用<1.2 MB，单周期运算耗时 ≤1.8 ms，完全满足现有 CAN 总线电控平台的实时性约束；其与 ECU 及执行层间通过 ISO 11898-2 协议实现

双向通信，指令刷新率稳定维持 1 kHz，无需更换泵阀本体或重构液压回路，具备即插即用式低成本升级能力 [2]。



图 7. 工程部署兼容性示意图

6. 结论

6.1 核心发现总结

本研究证实，融合工况识别与耦合约束的泵阀协同控制策略，在复杂作业场景下可同步提升节能性、响应性与鲁棒性；节能效果呈现显著工况依赖性，高动态负载工况下节能量达 18.7%，较传统 PID 策略提升 9.3 个百分点，且压力超调抑制率提高 42.1%。

6.2 理论贡献与实践价值

本研究提出的物理约束引导型协同控制范式，从根本上重构了液压系统多变量耦合优化的理论路径，突破了传统单点节能策略的维度局限；所构建的泵阀联合响应机制在复杂工况下展现出鲁棒的能量调度能力，经企业级耐久性测试验证，其平均节油率达 12.4%，具备明确的产业化落地可行性。

6.3 后续研究方向

后续研究将面向多机协同调度场景，构建分布式泵阀协同优化框架；发展基于数字孪生的远程能效诊断机制，实现全生命周期能效溯源；重点探究低温工况下液压油黏度时变特性对耦合矩阵在线修正精度的影响规律，并建立黏温-动态响应联合补偿模型。

参考文献：

- [1] 全忠义, 周宏伟, 宗宣军, 徐舟, 孙永辉. 非设计工况下综合能源系统多目标模糊协同优化[J]. *Energies*, 2019, 12(5): 830.
- [2] 葛磊, 全龙, 张晓刚, 董志新, 杨静. 变速变排量动力源驱动液压挖掘机的功率匹配与能效提升[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 32(1).
- [3] 郭瑞强, 张龙, 赵瑞龙. 供暖暖通节能技术相关问题及其解决对策探讨[J]. *城市建筑与发展*, 2026, 7(4): 205-207.
- [4] 侯红泽. 电气自动化工程节能设计技术的思路探究[J]. *城市建筑与发展*, 2026, 7(6): 148-150.
- [5] 傅文博, 袁晓明, 李永泉, 张立杰. 基于二次可控主阀的挖掘机负流量控制系统最优控制研究[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 7566-7573.
- [6] 白晓东, 杨军, 张庆涛, 宋胜利. 城市集中供热系统节能降耗策略研究[J]. *工程施工新技术*, 2026, 5(10): 121-123.
- [7] 宋胜利, 张庆涛, 白晓东, 杨军. 集中供热节能降耗措施浅析[J]. *现代工程项目管理*, 2026, 5(8): 88-90.
- [8] 李瑞川, 张义生, 冯震, 徐继康, 吴晓伟, 刘梦楠, 夏宇海, 孙启友, 袁文涛. 液压控制系统节能技术研究进展综述[J]. *Processes*, 2023, 11(12): 3304.
- [9] 杨明坤, 陈格鑫, 卢建新, 于聪, 闫贵山, 爱超, 李艳文. 电液伺服泵控系统能量传递机理研究[J]. *Energies*, 2021, 14(16): 4869.
- [10] 胡泽文. 智慧热网水力平衡优化与碳排放关联性[J]. *城市建筑与发展*, 2026, 7(7): 19-21.
- [11] 贺雅兰. 电厂循环冷却水系统优化运行与节能研究[J]. *水利电力技术与应用*, 2026, 8(9): 73-75.
- [12] 阳张. 煤矿机电设备中变频节能技术应用研究[J]. *机械与电子控制工程*, 2026, 8(6): 19-21.