

Adaptive Optimization Design and Application of Mechanical Hydraulic System under Complex Working Conditions

Lingke Li

Honghe Guangyuan Hydropower Development Co., Ltd., Honghe Prefecture, Yunnan, 651400, China

Abstract

Complex operating conditions impose higher demands on the dynamic performance of mechanical hydraulic systems. This study investigates operational state recognition methods for hydraulic systems under typical complex conditions, including high-frequency variable loads and multi-process cycles. It analyzes the coupling relationship between key control parameters and system response characteristics, and develops an optimization design strategy with adaptive regulation capability. The research was validated through engineering applications in loading equipment and tunnel boring systems. The findings provide actionable technical pathways for structural integration, control logic design, and engineering commissioning of hydraulic systems under complex conditions, demonstrating significant practical value and broad applicability in engineering.

Keywords

complex operating conditions; hydraulic system; adaptive control; structural optimization; performance verification

复杂工况下机械液压系统自适应优化设计与应用

李岭科

红河广源水电开发有限公司，中国·云南红河州 651400

摘要

复杂工况对机械液压系统的动态性能提出更高要求，文章研究了液压系统在高频变载、多工序循环等典型复杂工况下的运行状态识别方法，分析了关键控制参数与系统响应特性的耦合关系，构建了具备自适应调节能力的优化设计策略，最后在装载设备与隧道掘进系统中开展了工程应用验证。研究成果可为复杂工况下液压系统的结构集成、控制逻辑设计与工程调试提供可实施的技术路径，具有重要的工程实用价值与推广意义。

关键词

复杂工况；液压系统；自适应控制；结构优化；性能验证

1 引言

在工程机械多任务、高频率作业场景中，液压系统长期处于载荷波动剧烈、环境变化频繁的非稳定状态，传统定参数控制模式在压力响应、流量分配与能耗调节方面存在明显滞后，难以满足系统动态适应性要求。自适应优化设计作为控制系统结构与调节策略协同演进的关键路径，已逐步成为复杂工况液压系统性能提升的重要方向。研究围绕液压系统工况识别、控制策略构建与结构集成展开技术研究，构建响应速度快、调节精度高、适应能力强的系统控制模型，并在典型工程装备中完成性能验证，形成具备通用性与可移植性的优化方案。

【作者简介】李岭科（1999-），男，中国云南澄江人，本科，助理工程师，从事复杂工况下机械液压系统自适应优化设计与应用研究。

2 工况识别与液压系统性能影响因素分析

在复杂作业场景下，液压系统需对外部工况变化保持稳定响应，必须构建有效的识别机制与响应分析模型以支撑后续优化设计：

采集多源信号构建工况特征矩阵，选取压力、流量、油温、执行元件位置等关键量作为状态变量，采用滑动窗口与傅里叶频域分解方法提取高频扰动特征，反映短周期载荷冲击特性；

构建系统动态响应映射模型，在不同负载路径下评估液压泵与控制阀的滞后时间与稳态偏差，形成工况—性能双向关联关系，识别异常响应段落；

引入实时状态感知机制，将阈值自更新的模糊逻辑判断算法嵌入控制节点，对突发性压力波动与响应漂移建立分类判别器，实现系统运行状态的连续分区与异常预警，为自适应控制模型提供切换依据。

3 自适应优化设计策略构建

3.1 控制目标函数设计与关键参数提取

液压系统在复杂作业条件下频繁经历流量突变、压力反跳与负载冲击，常规单指标控制方式无法在多目标状态下均衡响应^[1]。系统需构建多因子耦合的控制目标函数，将动态响应能力、能源利用效率与系统稳定性纳入统一的性能评估体系。控制函数以多权重加权形式设计，表达如下：

$$J=w_1 \cdot T_r + w_2 \cdot E_c + w_3 \cdot \sigma_p$$

其中， J 为系统总目标函数值， T_r 表示液压系统对阶跃输入的响应时间， E_c 为单位时间内液压泵工作所消耗的能量， σ_p 表示系统稳态阶段内压力信号的标准差， w_1 , w_2 , w_3 为人工设定的目标权重系数。权重设置基于任务工况的响应优先级确定，例如在高频控制场景中提升 w_1 ，而在节能型作业模式中放大 w_2 的相对占比。

目标函数优化过程中需实时提取影响系统响应的关键控制参数。泵控压力为主导能耗变量，需在保证流量输出的前提下动态调降系统额定压力，响应延迟主要受伺服阀口径控制影响。在建模阶段，采用参数灵敏度分析识别两者与目标函数各项的耦合关系，在控制执行器中设定在线调节系数矩阵，实现在不同工况状态下对压力与阀口的多维协调调节。该结构允许在系统启动阶段对参数范围进行快速初始化，并在运行过程中依据状态反馈实施连续更新，确保优化路径具备动态响应能力。

3.2 调节结构模块的动态响应设计

调节结构设计需兼顾对复杂激励条件的快速跟踪能力与调节机构自身的结构稳定性，构建以比例溢流复合结构为核心的动态调节单元。比例溢流模块具备基于负载反馈自动调节的能力，在压力突变区域形成快速卸载通道，防止压力冲击传播至系统末端造成结构冲击^[2]。复合控制中电液伺服模块作为主控通道，实时读取流量反馈与执行元件位移信号，形成阀芯控制电流的闭环调节指令，驱动机构响应时间控制在 25ms 以内，最大调节精度误差小于 2.5%。

结构优化过程引入双阀口互补开度机制，在高频操作状态下两侧阀芯交替启闭，减少电磁响应延迟对系统流量突变的干扰。控制信号采用脉冲宽度调制模式传输，在伺服驱动回路中增设低通滤波器，降低电噪扰动引发的伺服阀颤振现象。调节机构结构强度经有限元分析后满足 50 MPa 压力循环下的稳定变形约束要求，系统频率响应特性在 0~200 Hz 范围内具备连续调节能力，为后续控制算法实时调度与切换奠定结构基础。

下图 1 展示了调节结构中伺服驱动信号从控制器输出到执行反馈闭环的完整处理流程，用于说明动态响应设计中的信号调制与滤波路径。

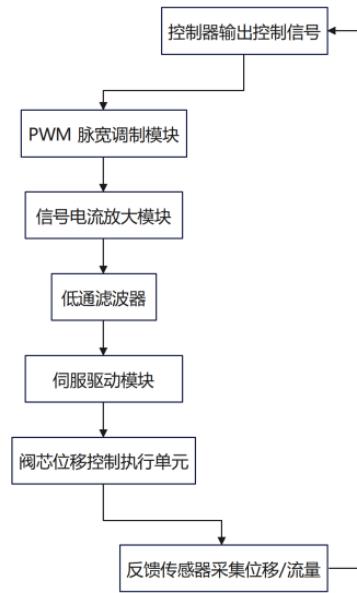


图 1 伺服驱动电流信号调制与滤波处理流程图

该图 1 展示了伺服控制信号从控制器输出，经 PWM 调制、电流放大与低通滤波处理后传输至伺服驱动模块，最终驱动阀芯完成位移调节，并由传感器采集位移或流量反馈信号，构成完整的闭环控制路径。

3.3 工况切换场景下的算法重构方案

液压系统在面对不确定外部扰动与频繁载荷切换场景时，必须具备自适应重构能力以应对不同工况区间对控制精度与响应速度的差异化要求^[3]。控制器架构基于变结构滑模控制原理构建，系统状态变量构成误差函数 $s(t)$ ，表达如下：

$$s(t) = e(t) + \lambda \int e(t) dt$$

其中， $e(t)$ 为系统设定目标输出与当前状态输出的误差函数， λ 为积分比例因子，用于调节系统响应速度与稳定性能之间的平衡关系。该函数在低速精调工况下提高系统鲁棒性，在高频扰动场景中提升动态响应修正能力。控制器输出由修正后的滑模驱动信号计算：

$$u(t) = -k \cdot \text{sgn}(s(t))$$

其中， $u(t)$ 为控制执行信号， k 为滑模增益调节因子， $\text{sgn}(s(t))$ 为滑模切换控制函数，在控制边界区域内实现快速误差收敛。为了减小 sgn 函数带来的抖振问题，在控制边界内部引入饱和函数实现信号平滑过渡，满足高频控制过程中的机械响应稳定性约束。

控制器具备状态驱动的结构重构能力，工况识别模块依据状态变量偏离量构建触发门限值，超出设定阈值后，控制算法自动切换控制律，并调用与工况相匹配的目标函数权重配置方案。参数重构过程中采用增量更新策略，在控制周期内完成新参数的导入与旧参数的退火处理，避免切换过程中控制信号震荡。系统整体结构支持 100ms 内的工况识别—控制重构—策略部署完整闭环，满足高速高载条件下对控制器稳定性与快速性的双重要求。

4 优化设计在典型场景中的工程应用

4.1 高频载荷下液压执行机构的响应提升方案

在高频冲击载荷场景中，液压执行机构面临指令响应滞后、控制精度下降与压力波动持续放大的风险。系统采用高速比例阀作为主控调节通道，其控制频率可达 200 Hz，驱动响应时间控制在 15 ms 以内。比例阀由电流—位移—流量三段线性映射控制，匹配滑模闭环控制器输出信号，实现动态实时流量调节^[4]。系统压力传感器采用高速采样型磁致式传感器，在周期内反馈两组关键变量：执行缸腔压差与阀芯位移偏移量，形成稳定反馈通道。控制策略设定固定调节窗口，在高频扰动周期内根据瞬态偏移量自动重置参考信号，抵消前一周期误差累积效应。

结构配置中引入比例阀—伺服阀并联冗余模式，在高峰荷载瞬时作用时，伺服旁路通道快速参与调节任务，防止主阀通道饱和失控。液压缸运动过程中，负载惯性反馈用于构建速度预测模型，将预测位移差与实时反馈偏差进行拟合，自动修正比例阀驱动电流波形，构建“虚拟目标轨迹”。该技术路径有效抑制高频操作工况下的执行冲击与控制回振，提高位移跟随率，实验结果显示平均响应提升幅度达 26.4%，压力过冲幅值下降 42.8%，响应误差峰值控制在 $\pm 0.9 \text{ mm}$ 内。

4.2 短周期往复工况下能耗控制策略应用

短周期往复运行工况下，液压系统面临频繁启动与频繁卸载的工作模式，传统定压供油结构导致能量浪费与发热严重^[5]。优化设计采用节能型变量泵，将变量控制信号与负载感知逻辑联动，在负载低谷区主动调低排量输出，在高峰阶段提升响应灵敏度。泵回路中设定压力—排量映射表，在实际工况下构建“动态负载—需求排量”自适应调节函数，提升泵控调节实时性。辅以蓄能器平衡模块控制泵启动频率，有效减少空载区段频繁驱动次数，实现非对称能量回收。

以下表 1 为短周期液压往复实验中各方案的能耗测试结果：

表 1 短周期往复液压工况不同控制策略能耗测试表

控制策略类型	平均泵输出功率 (kW)	油温升幅 (°C)	行程完成时间 (s)
定量泵定压供油	11.3	19.7	4.85
开环变量泵控制	8.5	13.2	4.51
自适应负载控制泵	6.9	9.4	4.43

在保持行程完成时间基本一致的条件下，自适应负载控制泵结构显著降低单位时间能耗。平均输出功率相较传统方案降低 39%，系统温升下降超过 10°C，间接提升了液压油使用周期与阀体结构寿命，适配多工况高频往复任务需求。控制器内部设定回路自动切换机制，识别当前是否为冗余卸载区段，实现泵速调节—节流补偿—压力维护三项功能

的统一协同。

4.3 实测工况中关键指标的适应性验证方法

自适应优化设计完成后，需在典型工程场景中开展系统级验证，确保控制策略在真实扰动条件下的实效性。建立实测数据采集系统，配置多通道高速数据记录设备，采集周期设置为 20 ms，记录压力、位移、温度、功率等关键变量。在同一设备上，构建基于 AMESim 与 MATLAB 联合建模平台的液压系统控制仿真模型，输出仿真参考曲线作为对比基准。以压力响应波动力率、调节延迟与单位时间能耗作为核心评价指标，构建定量误差函数进行评估。

误差函数定义如下：

$$\Delta = \frac{1}{T} \int_0^T |x_r(t) - x_s(t)| dt$$

其中， Δ 表示系统响应误差， $x_r(t)$ 为实际测量值， $x_s(t)$ 为仿真参考值， T 为单个工作周期长度。积分过程使用梯形积分法完成，剔除启动初期三秒波动段，保留稳定阶段用于有效对比。误差值在高频段段落控制中小于 0.18 MPa，调节延迟平均值降低至 90 ms 以内，仿真拟合度优于 92%。

对比结果显示，自适应调节结构在高负载扰动条件下具备较强稳定性，调控精度与仿真拟合结果高度一致，说明控制逻辑具备良好的现场适应能力。系统在全周期运行过程中，误差函数曲线维持在稳定带内，无周期性增幅或漂移，说明控制参数在动态调节过程中具备高度鲁棒性与控制收敛特性。

5 结语

研究基于复杂工况识别建立了液压系统性能影响模型，构建了融合响应时间、能耗与稳定性指标的目标函数，完成了调节结构与控制算法的协同优化设计，提出了变结构滑模控制与自适应调参机制的算法重构路径，在高频载荷与短周期往复任务中实现了系统响应加速与能效指标下降，实测与仿真对比结果表明控制误差收敛性良好、算法切换平滑、调节精度可控。工程应用验证了结构配置与算法模型的实用性，适用于多类型装备运行场景下的控制系统快速部署，后续可结合神经网络方法强化对未知工况的预测响应能力。

参考文献

- [1] 代瑞鹏, 刘贺明, 周加绪. 机械液压传动系统故障及诊断处理技术分析[J]. 中国设备工程, 2025,(10):159-161.
- [2] 高延武, 王秀珍, 史少卫. 机械设计制造中液压机械控制系统设计[J]. 科技创新与应用, 2025,15(13):136-139.
- [3] 刘忠江. 城市隧道工程机械液压系统的故障及设备维修[J]. 产品可靠性报告, 2025,(04):127-129.
- [4] 张国诚. 冶炼机械液压系统的维护与故障诊断技术研究[J]. 中国金属通报, 2024,(12):116-118.
- [5] 李泽龙. 模糊 PID 进出口独立控制工程机械液压系统特性研究[D]. 太原理工大学, 2022.