

液压挖掘机多执行机构协调控制与节能策略

赵 乾

中交海洋建设开发有限公司 天津 300453

摘要: 本文系统性地剖析了传统液压挖掘机在多机构复合动作中存在的问题,深入探讨了其根源在于开中心定量泵系统的固有局限性以及各执行机构间缺乏有效的功率分配与运动协调机制。在此基础上,论文从系统架构革新、先进控制算法应用、能量回收再利用以及智能化作业规划四个维度,构建了一套全面的协调控制与节能优化体系。研究表明,通过采用负载敏感、电液比例或混合动力等新型液压系统架构,结合基于工作机理模型的自适应控制、模糊逻辑控制及预测性能量管理策略,并深度融合能量回收技术和智能作业路径规划,能够显著提升多机构协同作业的平顺性、精准性和响应速度,同时大幅降低系统能耗,为推动液压挖掘机向高效、智能、绿色方向发展提供坚实的理论支撑与技术路径。

关键词: 溢压挖掘机; 多执行机构; 协调控制; 节能策略

引言

液压挖掘机作为多自由度、强非线性、时变耦合的机电液一体化系统,其动臂、斗杆、铲斗与回转机构需精密协同以完成复杂作业。然而,传统开中心定量泵液压系统在多机构复合动作时存在压力波动大、流量分配失衡、动作干扰、响应迟滞及能耗高等问题。根源在于系统采用节流调速,由最高负载决定系统压力,其余机构通过节流产生压降,造成严重节流损失;同时缺乏对作业任务的整体感知与机构间主动协调,依赖操作员经验,导致动作生硬、效率低下。这不仅影响作业性能,也违背节能减排与“双碳”目标。因此,突破传统液压系统局限,构建高精度、高效率、低能耗的智能协同控制与节能体系,已成为挖掘机技术升级的关键方向。

1 液压挖掘机多执行机构协调控制的核心挑战

1.1 液压系统架构的固有局限性

传统液压挖掘机多采用开中心六通阀控的定量泵或恒功率变量泵系统,存在显著固有缺陷。该架构下,液压泵持续输出高压油,中位时油液经溢流阀回油箱,造成“卸荷损失”。在复合动作工况中,系统压力由最高负载执行机构决定,其余低负载机构需通过节流口消耗多余压差以维持速度,导致严重节流损失,能量以热能形式耗散,降低效率并加剧油温升高。同时,流量分配依赖阀口开度,各机构动作相互耦合:一旦某机构(如动臂)突遇高负载,系统压力骤升,将导致其他机构(如斗杆、铲斗)速度突变甚至停滞,破坏作业连贯性与操控性。这一压力强制匹配机制是制约效率与性能的核心瓶颈。

1.2 多机构间的强耦合与干扰

液压挖掘机的动臂、斗杆、铲斗和回转机构在空间运动学上高度耦合,共同决定铲斗齿尖位姿。传统控制仅依据单个手柄信号独立驱动对应阀芯,忽视机构间的内在关联,导致复合动作时各机构运动简单叠加,轨迹不平滑、效率低下,并引发运动冲突、冲击与振动,加速机械磨损^[1]。更严重的是动力学耦合:各机构在变速或负载变化时产生的惯性力和作用力通过刚性结构相互传递,形成复杂动态干扰。而传统系统缺乏对这类耦合干扰的感知与补偿能力,显著降低动态响应性能与控制精度,影响作业流畅性与设备寿命。

1.3 能量利用效率低下

除了前述的节流损失外,液压挖掘机在作业循环中还存在其他形式的巨大能量浪费。首先,在动臂下降、斗杆收回等重力势能或动能释放的过程中,传统系统无法有效回收这部分能量,而是通过平衡阀将其转化为热能耗散掉。其次,在频繁的启动、制动和换向过程中,大量的动能也以摩擦和冲击的形式被白白浪费。据统计,在一个典型的挖掘-装载作业循环中,真正用于克服土壤阻力的有效功占比不足30%,其余大部分能量都消耗在了系统内部的各种损失上。这种低下的能量利用效率不仅增加了用户的燃油成本,也对环境造成了不必要的负担。因此,如何系统性地识别并回收这些被浪费的能量,并将其重新用于驱动系统,是提升整机能效的关键突破口。

2 面向协调控制的液压系统架构革新

2.1 负载敏感(LS)与负荷传感(LUDV)系统

为克服传统开中心系统的固有缺陷,负载敏感(Load Sensing, LS)系统应运而生,并已成为现代中高

端液压挖掘机的标准配置。LS系统的核心思想是“需求驱动”，即液压泵的输出压力和流量始终跟随负载的实际需求而动态调整。系统通过梭阀网络实时检测所有正在工作的执行机构中的最高负载压力，并将此压力信号反馈给变量泵的调节器。泵的输出压力仅比最高负载压力高出一个微小的恒定压差（通常为15-30 bar），用于克服管路和阀口的流动阻力。这样，无论各执行机构的负载压力如何差异，系统都能以最小的必要压力供油，从根本上消除了因压力不匹配而产生的节流损失。在此基础上发展起来的负荷传感（LUDV）系统进一步优化了流量分配^[2]。LUDV系统采用压力补偿阀，确保分配给每个执行机构的流量仅取决于其控制阀的开口面积，而与其负载压力无关。这使得在复合动作中，各机构能够真正实现独立、互不干扰的速度控制，极大地提升了操控的平顺性和精准性。

2.2 电液比例与数字液压系统

随着电子技术和传感器技术的发展，电液比例控制和数字液压技术为实现更高层次的协调控制提供了可能。在电液比例系统中，传统的机械拉杆被高精度的电液比例阀所取代。操作手柄的位移信号被转换为电信号，经由车载控制器（ECU）处理后，精确地控制比例阀的开度。这种架构打破了机械连接的限制，使得控制器能够介入并重塑操作员的原始指令。例如，ECU可以根据预设的作业模式或实时感知的工况，对多个手柄信号进行融合、滤波或增益调整，从而输出一组经过优化的协调控制指令，引导各执行机构完成更流畅、更高效的复合动作。数字液压系统则更进一步，它将高速开关阀、步进电机或伺服电机等数字元件集成到液压回路中，通过脉宽调制（PWM）或脉冲频率调制（PFM）等离散控制方式，实现对流量和压力的数字化、高精度调控。这种系统具有响应快、抗污染能力强、易于与数字控制器集成等优点，为实现复杂的自适应控制和能量管理策略奠定了硬件基础。

2.3 混合动力与电动化液压系统

混合动力挖掘机通常采用“发动机-发电机-电动机/电池”的构型。发动机不再直接驱动液压泵，而是以恒定高效工况运行，带动发电机发电。电能一部分用于驱动电动机，进而带动液压泵，另一部分则存储在电池或超级电容中。在系统需要峰值功率时（如强力挖掘），电池可以瞬间释放电能，与发动机共同提供动力；而在能量回收阶段（如动臂下降），电动机转变为发电机，将势能转化为电能回充至储能单元。这种架构实现了发动机与液压负载的解耦，使其始终运行在最佳燃油经济

区，同时通过电能的缓冲和再利用，显著提升了整机的能源利用效率。全电动液压系统则彻底取消了内燃机，完全依靠大容量电池组供电，实现了零排放和极低的噪音，特别适用于对环保要求极高的室内或城市作业场景。

3 先进的多机构协调控制算法

3.1 基于工作机理模型的自适应控制

要实现真正意义上的多机构协调，控制器必须超越简单的信号传递，深入理解挖掘机的工作机理。基于此，研究者们建立了包含运动学、动力学和液压系统特性的整机综合数学模型。利用该模型，可以设计出自适应协调控制器。这类控制器能够实时计算出完成特定作业任务（如让铲斗齿尖沿预定轨迹运动）所需的各关节最优速度和力矩分配。它不再是被动地响应手柄输入，而是主动地将操作员的高层意图（如“挖一条直线沟”）分解为底层的、协调一致的各机构控制指令。自适应机制则能在线估计系统参数（如负载、摩擦系数）的变化，并实时调整控制律，确保在不同工况下都能保持良好的跟踪性能和鲁棒性，有效抑制了机构间的动态耦合干扰。

3.2 模糊逻辑与神经网络智能控制

对于液压挖掘机这样一个高度非线性、不确定性强的复杂系统，建立精确的数学模型十分困难。为此，模糊逻辑控制和神经网络等智能控制方法提供了有效的解决方案。模糊逻辑控制器不依赖于精确的数学模型，而是基于专家经验或操作员的直觉，构建一系列“如果-那么”形式的模糊规则。例如，“如果动臂负载很高且斗杆速度很快，那么适当降低斗杆的供油流量以保证动臂的动力”。通过模糊推理和解模糊化，控制器能够模拟人类专家的决策过程，实现对多机构间功率的智能分配和动作的平滑协调^[3]。神经网络则具有强大的非线性映射和自学习能力。通过离线训练或在线学习，神经网络可以逼近复杂的系统逆动力学模型，直接将期望的铲斗末端轨迹映射为各关节的控制输入，从而绕过繁琐的正向建模过程，实现高精度的轨迹跟踪控制。

3.3 预测性能量管理与协调策略

在混合动力或带有能量回收装置的系统中，协调控制的目标不仅是运动性能，还需兼顾全局能量效率。预测性能量管理策略正是为此而生。该策略利用短期作业任务规划或历史作业数据，对未来一段时间内的功率需求进行预测。基于此预测，能量管理系统可以提前做出决策：何时让发动机工作在高效区充电，何时利用储能单元提供辅助功率，何时最大化地回收制动能量。这种前瞻性的控制，避免了能量在“发动机-液压系统-储能单

元”之间无谓的多次转换损失，实现了能量流的全局最优调度。同时，协调控制算法可以与能量管理策略深度融合，例如，在保证作业效率的前提下，优先选择那些能最大化能量回收的运动路径或速度曲线，从而在完成任务的同时，实现能耗的最小化。

4 能量回收与再利用技术

4.1 动臂势能回收系统

动臂是液压挖掘机中质量最大、运动幅度最高的部件，其升降过程中蕴含着巨大的重力势能。在传统系统中，动臂下降时，高压油液被迫流经平衡阀，能量以热能形式耗散。势能回收系统旨在捕获这部分能量。主流的技术路线包括液压蓄能器式和电气式。液压蓄能器式系统在动臂油缸的回油路上并联一个蓄能器。当动臂下降时，油缸排出的高压油液一部分流入蓄能器，将其压缩，从而将势能转化为液压能储存起来^[4]。在动臂下次提升或系统需要辅助动力时，蓄能器释放高压油液，与主泵共同供油，减少发动机的瞬时负荷。电气式系统则通过将动臂油缸与一个液压马达-发电机单元相连，动臂下降驱动马达旋转发电，电能存储于电池或超级电容中，后续再用于驱动电动机辅助作业。

4.2 回转动能回收系统

上车回转机构在启动和制动过程中同样伴随着显著的动能变化。回转动能回收系统通常在回转马达的进油口之间设置一个与蓄能器相连的液压回路。当需要制动时，回转马达在惯性作用下继续转动，此时将其切换至泵工况，将液压油泵入蓄能器，实现动能到液压能的转化。在下次回转启动时，蓄能器释放能量，辅助主泵驱动回转马达，缩短加速时间并降低油耗。由于回转动作频繁，即使每次回收的能量不多，累积效应也非常可观。

4.3 系统级能量整合与管理

单一的能量回收装置虽然有效，但若缺乏系统层面的整合与管理，其效能将大打折扣。一个高效的能量回收系统必须与前述的混合动力架构和智能能量管理策略紧密结合。储能单元（无论是蓄能器还是电池）的容

量、充放电功率必须与整机的功率需求相匹配。能量管理系统需要实时监控储能单元的状态（如压力、荷电状态），并根据当前的作业模式、预测的功率需求以及操作员的意图，智能地决定能量的流向：是存储、释放，还是维持现状。只有通过这种全局性的、动态的优化管理，才能确保回收的能量在最需要的时候、以最高效的方式被重新利用，从而最大化整个系统的节能效益。

5 结语

液压挖掘机多执行机构的协调控制与节能优化是融合液压、机械、电子、控制与能量管理的复杂系统工程。本文从系统架构、控制算法和能量回收三方面，梳理了技术演进路径：未来高性能挖掘机将以负载敏感或电液比例系统为骨架，基于模型的自适应与智能算法为“大脑”，高效集成的能量回收系统为“心脏”。三者协同，可实现执行机构精准、平顺、高效联动，并大幅提升整机能效。这不仅是响应市场需求与环保法规的必然方向，更是推动我国工程机械迈向全球价值链高端、实现高质量发展的核心驱动力。随着人工智能、物联网等技术深度融合，挖掘机的智能化与绿色化前景将更加广阔。

参考文献

- [1]孙晓红.液压挖掘机铲斗、斗杆以及动臂的PID控制效果研究[J].机械管理开发,2023,38(08):189-190.
- [2]陈俊翔.数字化液压挖掘机单轴运动与多轴协调控制研究[D].燕山大学,2025.DOI:10.27440/d.cnki.gysdu.2025.000019.
- [3]常宽,何美桂,胡石.液压挖掘机动臂能量回收系统优化设计与节能效果验证[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2026,44(02):95-98.
- [4]赵振飞.液压挖掘机液压系统节能技术研究[C]//广西网络安全和信息化联合会.第十四届工程技术管理与数字化转型学术交流会议论文集(下册).徐州徐工矿业机械有限公司,2025:58-60.