

液压挖掘机功率损失分析及节能控制技术研究

吴庆礼

徐州徐工矿业机械有限公司, 江苏 徐州 221000

DOI:10.61369/ERA.2026020016

摘 要 : 液压挖掘机是工程建设的核心装备, 其功率利用效率直接影响施工成本与环境效益。目前液压挖掘机普遍存在功率损失大, 能耗偏高的问题, 阻碍了行业绿色发展。本文以液压挖掘机动力传递链为研究主线, 系统分析功率损失的核心成因与表现形式, 重点剖析液压系统中的溢流损失、节流损失、泄漏损失及机械摩擦损失, 揭示各损失类型的内在作用机理。在此基础上, 从回路架构革新, 元件性能升级, 控制策略优化三个维度, 提出了负载敏感控制, 功率匹配调控, 能量回收利用等关键节能技术方案, 阐明各类技术的节能原理与实施路径。研究结果可以为液压挖掘机节能性能提升提供理论支撑与技术参考, 助力工程机械行业实现能效升级与低碳转型。

关 键 词 : 液压挖掘机; 功率损失; 节能控制; 负载敏感; 功率匹配

Power Loss analysis and Energy-saving Control Technology of Hydraulic Excavator

Wu Qingli

Xuzhou XCMG Mining Machinery Co., Ltd., Xuzhou, Jiangsu 221000

Abstract : Hydraulic excavator is the core equipment of engineering construction, and its power utilization efficiency directly affects the construction cost and environmental benefits. At present, hydraulic excavators generally have the problems of large power loss and high energy consumption, which hinders the green development of the industry. This paper takes the power transmission chain of hydraulic excavator as the research thread, systematically analyzes the core causes and manifestations of power loss, focusing on the overflow loss, throttling loss, leakage loss and mechanical friction loss in the hydraulic system, and reveals the internal mechanism of each loss type. On this basis, from the three dimensions of loop architecture innovation, component performance upgrade and control strategy optimization, key energy-saving technical schemes such as load-sensitive control, power matching regulation and energy recycling are put forward, and the energy-saving principles and implementation paths of various technologies are expounded. The research results can provide theoretical support and technical reference for improving the energy-saving performance of hydraulic excavators, and help the construction machinery industry to achieve energy efficiency upgrade and low-carbon transformation.

Keywords : hydraulic excavator; power loss; energy saving control; load sensitive; power matching

引言

液压挖掘机凭借其强大的作业能力, 在基础设施建设领域是不可或缺的核心装备, 其工作效率与能耗水平直接关系到工程建设的综合效益。随着全球能源危机的加剧与环保法规的收紧, 传统液压挖掘机高能耗、高排放的弊端日益凸显, 节能技术升级已成为行业发展的必然趋势。液压挖掘机的动力传递过程涉及发动机、液压泵、控制阀门、执行机构等多个环节, 能量在传递与转换中必然伴随功率损失, 部分机型的功率利用率甚至不足30%^[1]。这些功率损失不仅导致燃油消耗大幅增加, 而且会引起系统发热、元件磨损增多等现象, 降低设备可靠性与使用寿命。因此, 深入剖析液压挖掘机功率损失的内在机理, 开发高效可行的节能控制技术, 对提高设备能效、降低施工成本、减少环境污染具有重要的现实意义。

一、液压挖掘机功率损失的核心成因与表现形式

液压挖掘机的功率传递遵循“发动机机械能—液压泵液压能—执行机构机械能”的转换路径，每个转换环节均存在不同类型的功率损失，且各类损失相互关联、相互影响，共同导致系统能效下降。根据功率损失的发生机理与所处环节，可将其划分为液压系统功率损失、机械摩擦功率损失及功率匹配失衡损失三大类，不同工况下各类损失的占比差异显著，其中液压系统相关损失占比最高。

(一) 液压系统中的主功率损失

液压系统是液压挖掘机功率损失的主要载体，其损失形式与液压油的流动状态、压力变化及密封性能直接相关，主要包括溢流损失、节流损失与泄漏损失三种类型，三类损失合计占系统总功率损失的70%以上。

溢流损失是液压系统最典型的功率损失形式，主要发生在系统压力超过安全阈值或流量供需失衡的场景。液压挖掘机作业工况复杂，负载波动大，当挖掘阻力突然增加导致系统压力超出溢流阀设定值时，溢流阀开启泄压，高压油直接流回油箱，发动机输出的功率全部转化为热能消耗。在回转机构启停过程中，由于上车回转惯量大，回转马达无法完全吸收液压泵输出的流量，多余流量通过溢流阀溢流回油箱，造成功率浪费^[3]。这种损失在重载挖掘、回转制动等工况下尤为突出，是系统能耗偏高的重要原因。

节流损失源于液压系统流量调节过程，主要通过阀门节流实现执行机构的速度控制。当手柄处于微动控制状态时，多路阀进出油口开度较小，液压油需克服阀口节流阻力才能进入执行机构，部分压力在此过程中转化为热能。当工作装置停止作业时，阀芯处于中位，液压泵输出的高压油虽经卸荷口流回油箱，但变量泵的功率自调节特性使其保持较大流量输出，形成旁路空流损失。这种节流损失贯穿于挖掘、回转、举升等各类作业工况，在精细作业场景下更为明显。

泄漏损失分为内泄漏与外泄漏两种形式，其中内泄漏对功率损失的影响更为显著。内泄漏主要发生在液压泵、液压马达、液压缸等元件的配合间隙处，高压腔的液压油通过间隙流入低压腔，使元件输出功率降低。内泄漏主要发生在液压泵的配流盘与转子之间、液压缸活塞与缸筒之间的配合间隙。泄漏量的大小与元件磨损程度、密封性能及系统压力直接相关，随着设备使用时间的增长，元件磨损加剧，将造成泄漏量很大地增加，不仅导致功率损失，而且会影响执行机构动作的精度与响应速度。不同类型液压系统的功率损失占比差异显著，见表1：

表1 不同类型液压系统的功率损失占比

系统类型	溢流损失占比 (%)	节流损失占比 (%)	泄漏损失占比 (%)	其他损失占比 (%)	系统总效率 (%)
传统开式回路系统	35-45	20-30	8-15	5-10	25-42
负载敏感回路系统	5-12	8-15	6-12	4-8	53-77
负载敏感+闭式回路系统	3-8	5-10	4-9	3-6	67-85

(二) 机械摩擦与功率匹配失衡损失

机械摩擦功率损失存在于设备的各运动部件，主要包括发动机内部摩擦，液压元件摩擦及工作装置机械摩擦。发动机在工作

时，活塞和气缸壁，曲轴和轴承之间的摩擦会消耗部分功率，特别是在高转速工况下，摩擦损失会大为增加。液压泵与液压马达内部的运动副，如柱塞与缸体、滑靴与斜盘之间的摩擦，同样会造成功率损耗^[3]。工作装置的回转支承、销轴与衬套等连接部位，在相对运动中产生的摩擦阻力也会消耗一定功率，这些摩擦损失虽单个占比不大，但累计起来对系统能效的影响不可忽视。功率匹配失衡损失是指发动机与液压系统的工作点无法实现最佳耦合，导致发动机功率利用不充分或过载运行。发动机的输出功率特性与液压泵的吸收功率特性存在匹配关系，当负载增加时，液压泵吸收功率增大，会导致发动机转速下降，偏离最佳工作区间，降低燃油效率。在高原等特殊环境下，发动机功率会因气压降低而下降，若液压泵的吸收功率设定不变，会进一步加剧功率匹配失衡。不同作业工况下，机械摩擦与功率匹配失衡损失的具体表现如下表所示：

表2 机械摩擦与功率匹配失衡损失的具体表现

作业工况	发动机内部摩擦损失 (kW)	液压元件摩擦损失 (kW)	工作装置摩擦损失 (kW)	功率匹配失衡损失 (kW)	该类总损失占比 (%)
空载怠速	3.2-4.5	1.1-1.8	0.3-0.6	5.8-7.2	85-92
轻载挖掘 (< 30% 额定负载)	4.8-6.3	3.5-4.9	1.2-1.9	6.5-8.1	42-51
重载挖掘 (> 70% 额定负载)	7.2-9.1	8.3-10.5	2.8-3.6	3.1-4.5	28-35
回转作业	5.5-7.0	5.1-6.8	2.1-2.9	4.3-5.7	36-44

二、液压挖掘机节能控制技术的核心路径

(一) 回路架构革新，从开式回路到负载敏感系统

传统液压挖掘机多采用开式回路设计，液压油经执行机构后直接回油箱，存在溢流损失大、流量控制精度低的问题。回路架构革新的核心方向是采用负载敏感回路与闭式回路的组合设计，实现流量按需分配，从根本上减少溢流与节流损失。负载敏感控制技术通过压力传感器实时感知各执行机构的负载需求，经负载敏感比例多路阀动态调节液压泵的输出流量与压力，使泵输出功率与负载需求精准匹配^[4]。当多个执行机构同时作业时，系统能自动优先满足高负载机构的流量需求，避免流量分配冲突带来的功率浪费。闭式回路则减少了液压油与空气的接触，降低油液污染风险，同时减小油箱容积与回油背压损失，提高系统效率。回路设计中还需合理优化液压管路布局，沿程压力损失是易被忽视的功率损失来源，液压油在管路中流动时会因摩擦阻力产生压力衰减。采用大通径管路、减少管路弯曲次数、选用低阻力管接头，可有效降低沿程压力损失。例如，用带弧度的管接头代替直角管接头，可使局部压力损失降低40%以上，此类细节优化对提升系统整体能效具有累积效应。

(二) 元件性能升级，提升核心部件能效基数

核心液压元件的性能直接影响系统的功率损失水平，元件升级的重点是提高容积效率、降低摩擦损失和加强密封性能。液压

泵作为能量转换的主体，其效率提升对系统节能至关重要。采用轴向柱塞变量泵代替定量泵，通过排量调节实现流量按需输出，在空载或轻载工况下自动减小排量，减少无用功消耗，且轴向柱塞泵响应更快，能及时跟随负载变化调整输出，进一步提高功率利用率。密封性能升级是降低泄漏损失的关键手段，采用聚氨酯与金属骨架复合结构的密封件，可使密封可靠性与耐磨性提升30%以上，内泄漏量减少50%^[5]。在液压缸设计中，缸筒采用镀铬加氮化处理工艺，表面硬度与光洁度显著提高，活塞杆喷涂陶瓷涂层后，摩擦系数与磨损速率降低40%—60%，不仅减少摩擦损失，还延长了元件使用寿命，降低维护成本。此外，使用高过滤精度装置与在线油液监测装置，可有效控制油液污染度，避免污染物加重元件磨损导致的泄漏增加，形成能效优化的良性循环。发动机作为动力源，通过高压共轨燃油喷射技术与涡轮增压技术的应用，其燃油燃烧效率可提升15%—20%，在输出相同功率的情况下显著降低燃油消耗。

(三) 优化控制策略，动态精准功率匹配

控制策略优化是连接机械结构与液压系统的核心纽带，通过电子控制与液压技术的深度融合，实现功率流的动态精准调控。发动机与液压泵的功率匹配控制是节能控制的核心环节，其原理为通过电液比例控制器实时监测发动机转速变化，动态调节液压泵排量，使液压泵吸收功率维持在发动机最佳工作区间。当负载增大导致发动机转速降低时，控制器及时减小液压泵排量，使发动机转速回升至平衡状态；当负载减小时，适当增大泵排量，充分利用发动机剩余功率，避免功率浪费。工况自适应控制算法利用CAN总线采集操作手柄信号、各执行机构压力与位移信号，自动识别挖掘、回转、举升等动作模式，动态调整泵排量与阀开度参数，进一步提升节能效果。在复合动作作业中，优化流量分配策略，减少动作冲突造成的功率损失，提高动作协调性和作业效率。如动臂提升与斗杆回收复合动作，通过各阀门开度的控制，可使动作同步误差降低60%以上，作业流畅性显著提高，能耗进一步降低。回收作业过程中产生的势能与动能，是节能控制的重要补充。动臂下降过程中，重物势能驱使液压缸无杆腔油液产生高压，传统系统通过节流阀将这部分势能转化为热能消耗，能量回收系统通过蓄能器或液压马达将高压油液的能量储存或转换为机械能，当动臂重提升时释放储存能量辅助液压泵做功，减少泵输出功率需求。回转机构制动时产生的动能也可以通过类似方式回收，也更进一步提高了系统能量利用效率。

三、节能技术应用效果与发展展望

在实践中综合应用负载敏感控制，功率匹配调控等节能技

术，取得了很好的节能效果。不同节能技术的应用效果及节能潜力也各不相同，如表3所示。

表3 不同节能技术的应用效果及节能潜力差异

节能技术类型	燃油消耗降低率 (%)	系统效率提升率 (%)	系统油温降低值 (°C)	适用工况	投资回收期 (月)
负载敏感控制技术	15-22	35-45	8-12	各类工况	12-18
功率匹配调控技术	10-16	25-32	5-8	负载波动大工况	10-15
动臂势能回收技术	8-14	18-25	6-9	频繁举升下降工况	15-20
回转动能回收技术	5-10	12-18	4-6	频繁回转工况	18-24
综合节能技术套餐	30-40	60-80	15-20	全工况	14-20

采用负载敏感回路与闭式回路组合架构的挖掘机，相比常规机型能耗降低30%以上，系统油温降低15—20°C，不仅降低燃油消耗，还延长了油液与密封件的使用寿命。功率匹配控制技术可保证发动机工作在最佳效率区间，在相同作业强度下燃油消耗率降低10%—16%，同时减少发动机启停频率，提高设备可靠性。采用能量回收系统则进一步挖掘节能潜力，在频繁举升下降的作业工况下，可额外降低8%—14%的能耗。未来液压挖掘机节能控制技术的发展将呈现三个趋势：智能化控制深度融合，通过人工智能算法的引入，实现系统参数的自学习与自适应调节，根据不同作业场景与操作员习惯动态优化控制策略，进一步提高功率匹配精度；电液融合技术升级，全面推广电液伺服比例阀的应用，实现流量与压力的精准控制，探索电动液压泵与传统发动机的混合动力模式，降低怠速与轻载工况下的能耗；轻量化与集成化设计，通过采用高

四、结论

液压挖掘机的功率损失，主要是液压系统的溢流损失、节流损失、泄漏损失，以及机械摩擦损失、功率匹配失衡损失，这些损失叠加导致系统能效偏低。针对上述问题，所提出的从回路架构革新，元件性能升级，控制策略优化3个维度提出的节能控制技术，从根本上减少无效功率消耗，优化功率传递路径。其中，负载敏感控制以便根据要求分配流量，功率匹配调控保证发动机与液压系统的最佳耦合，能量回收技术，使废弃能量得到二次利用，这四种技术的结合应用，为液压挖掘机节能升级提供了有效路径。

参考文献

- [1] 马军辉, 高春莹, 陈俊翔, 刘英豪, 艾超. 正流量液压挖掘机多路阀阀口压力损失研究 [J]. 机床与液压, 2024, 52(07): 163-170.
- [2] 桑勇, 岳亦锋, 李国锋, 刘伟胤, 曹旭阳, 王海洋. 正流量液压挖掘机回转系统节能控制 [J]. 液气气动与密封, 2024, 44(01): 1-8.
- [3] 邓剑洋. 面向正流量液压挖掘机的分阶段功率匹配节能控制研究 [D]. 大连理工大学, 2023.
- [4] 王萌. 基于自抗扰技术的挖掘机协同控制系统的设计 [D]. 河北工程大学, 2022.
- [5] 周多虎. 液压机节能控制技术发展探讨 [J]. 内燃机与配件, 2022, (05): 85-87.