

液压压力控制系统的节能控制方法探讨

陈高松

杭州鑫高科技公司 浙江杭州 310007

摘要：在全球工业能耗构成中，工业液压系统占据12%~15%的比例，但其运行效率普遍低于40%。传统阀控系统因节流损失问题突出，该类损失最高可达系统总能耗的60%，这意味着该领域存在20%至50%的节能优化空间（数据来源：IFPE、Fluid Power Journal）。本文聚焦工业液压压力控制系统的节能技术展开深入研究，对变速驱动、负载敏感、压力补偿等核心技术进行系统剖析。研究成果旨在为工业液压系统的能效优化提供理论支撑与实践参考，推动相关行业的绿色低碳转型进程。

关键词：液压压力控制系统的节能控制方法探讨

引言

作为工业领域的主要耗能设备，工业液压系统在工厂总能耗中的占比达到10%~30%（IFPE统计数据）。传统阀控技术由于节流损失严重，导致系统运行效率低下，加剧了能源的不合理消耗。从经济角度分析，能耗成本在设备生命周期成本中占据高达70%的比例（U.S.DOE研究结论），实施节能技术可显著降低企业的运营成本。在环境保护层面，全球范围内的CO₂减排政策（如ISO50001标准）对工业系统能效提升提出了明确要求，这也促使液压技术必须进行革新，为工业液压领域的能效提升提供创新性思路与技术支持。

一、液压系统能耗机理分析

液压系统的能耗机理可从能量传递链条、损失环节以及节能逻辑三个维度进行解析^[1]。能量传递过程以“动力源（泵）—压力生成（阀组）—执行机构（缸/马达）—负载”为核心链路，泵的压力-流量特性（如定量泵的恒定排量特性、变量泵的按需调节特性）决定了系统的能量输入模式。阀控环节通过节流方式，总输入功率 $P_{in}=P_{hyd}+P_{loss}$ 、液压功率 $P_{hyd}=p \times Q$ 系统总效率、 $\eta_{sys}=\eta_{pump} \times \eta_{valve} \times \eta_{actuator}$ 实现流量分配，执行机构则负责将液压能转化为驱动负载的机械能。

在主要能量损失方面，节流损失在阀控系统中表现尤为显著（如传统节流调速回路中，该损失占比可达30%~60%），其产生原因是阀口压差与流量的耦合作用导致能量以热量形式散失；溢流损失（常见于定量泵系统，当溢流阀开启时，能量损耗占泵输出的20%~50%）

源于系统压力超调现象；空载损耗（设备待机时，因泵卸荷不充分或维持压力产生的无效能耗，占比5%~15%）以及机械/容积效率损失，柱塞泵效率约为85%~95%，齿轮泵效率低至70%~80%）进一步增加了系统能耗。节能控制的核心逻辑在于实现压力-流量的精准匹配以及能量回收利用：前者可通过变量泵，将压差控制在0.5~1MPa，流量误差控制在 $\leq 5\%$ ）或变频驱动技术（使电机转速与负载流量相匹配，节能率可达20%~30%），实现“按需供能”；（见表1）

表1 典型能耗分布

能耗类型	占比	成因
节流损失	35-60%	阀口压降 Δp
溢流损失	15-30%	高压溢流
机械摩擦	10-20%	泵/马达效率
容积损失	5-15%	泄漏量 Q_{leak}

二、工程应用与挑战分析

1. 典型行业应用场景

在注塑机应用场景中，变频驱动技术与压力闭环控制相结合（如何伺服电机搭配轴向柱塞泵，可实现 $\pm 1\%$ 的流量控制精度与 $\pm 0.2\text{MPa}$ 的压力控制精度），能够在锁模、射胶等阶段实现能量的按需分配。以3000kN注塑机为例，传统定量泵系统每小时能耗为120kW·h，采用变频控制后，能耗降至70~90kW·h（节能率25%~42%），射胶速度响应时间 $\leq 40\text{ms}$ ，成型尺寸公差控制在 $\pm 0.03\text{mm}$ ，满足电子外壳等精密注塑件的生产需求。

压铸机场景中，负载敏感泵（压差控制在0.6~1.0MPa）与蓄能器配合使用，可回收压射过程中的

能量(回收效率40%~55%)。针对镁合金压铸的高速压射过程(速度15~25m/s),该方案可使系统平均功率降低30%~40%,压射压力波动 $\leq 1.5\text{MPa}$,提升铸件致密度(气孔率 $\leq 0.5\%$),适用于新能源汽车零件的压铸工艺。

机床液压站采用数字阀(12位分辨率,响应频率80Hz)进行精密压力控制,以五轴加工中心液压系统为例,进给轴压力控制精度可达 $\pm 0.08\text{MPa}$,流量分配误差 $\leq 0.5\%$,空载能耗从20kW降至5~7kW(降幅65%~75%),主轴定位精度 $\pm 0.005\text{mm}$,表面粗糙度 $Ra \leq 0.1\mu\text{m}$,能够支撑高速铣削(转速20000r/min,进给速度60m/min)的动态性能要求^[2]。

2. 技术实施障碍

在系统复杂度方面,变频、负载敏感、能量回收等多项技术的融合应用,需要构建分布式控制架构(如EtherCAT总线,通讯周期 $\leq 1\text{ms}$),控制器需集成模型预测控制(MPC)算法(运算量 $\geq 100\text{MFLOPS}$),这导致系统调试周期较传统系统延长30%~40%。此外,故障诊断需要对泵-蓄能器压力振荡等多参数进行关联分析(如频域特征提取),增加了运维的技术难度^[3]。

动态响应稳定性方面,当负载发生突变(如注塑机射胶流量突变率 $\geq 60\%/ms$)时,需将压力超调控制在 $\leq 3\%$,这需要采用自适应滑模控制技术(鲁棒性提升40%~50%),但参数整定依赖具体工况,现场调试需要进行多次迭代优化,平均耗时2~3周。成本权衡方面,伺服泵、数字阀等节能设备的采购成本较传统方案高出40%~60%(如150kW系统初期投资增加20~30万元),虽然通过能耗节省(年节电30~40万kW·h,按电价0.8元/kW·h计算,年节约成本24~32万元)可在3~4年内实现投资回报,但对于设备更新预算 ≤ 25 万元的中小企业而言,仍构成较大的资金压力。此外,行业内缺乏统一的能效测评标准(如液压系统动态能效指标未进行量化),导致技术效果难以进行对标,需要建立基于ISO14914的本地化能效模型(包含压力波动、流量响应等动态参数),以推动技术选型与成本优化。

三、液压压力控制系统的节能控制方法

1. 数字液压阀与高频PWM协同控制

该控制方法以工作频率超过200Hz的高频开关阀阵为核心构建数字液压控制单元,取代传统比例阀的机械液压先导结构。通过脉宽调制(PWM)法对阀口开度进行动态调节,并结合压力闭环反馈机制实时补偿流量波

动,从而实现精准的压力控制。从技术原理来看,高频开关阀阵采用直驱式电磁控制结构,省去了传统阀的先导油路,从根本上消除了占传统阀功耗30%的先导级损耗;PWM算法基于实时监测的负载压力数据,以 $100\mu\text{s}$ 级的控制周期动态调整阀口通断比,使系统输出压力与负载的瞬时需求精确匹配,将溢流损耗降低至传统系统的15%以下;搭配响应速度达5ms的压力闭环反馈(较传统阀提升50%),有效抑制压力超调,将压力波动控制在 $\pm 0.3\text{MPa}$ 以内(满足精密注塑机保压阶段 $< \pm 0.5\text{MPa}$ 的要求)。

在节能机制上,直驱电控架构去除了先导油路,消除了先导泵持续运转产生的能量消耗;PWM动态匹配技术使系统在不同负载工况下的压力过剩量控制在5%以内,较传统阀控系统减少40%的溢流损失;低滞环特性(滞环误差 $< 1.5\%$)避免了压力反复调整带来的能量浪费。在实际应用中,精密注塑机保压阶段采用该方法可使保压能耗较传统系统降低35%,同时满足压力波动 $< \pm 0.5\text{MPa}$ 的高精度要求;在机床液压夹具系统中,能够实现夹具压力的快速精准响应(响应时间 $< 20\text{ms}$),减少空压状态下的能量维持损耗,使系统综合能效提升28%^[4]。

2. 电动静液执行器(EHA)变压力控制

采用机电液一体化设计理念,通过伺服电机直驱双向齿轮泵构建封闭式容积传动系统,运用压力与转速解耦控制策略,实现电机转速对系统流量的线性调节以及电机扭矩对输出压力的直接控制,并集成再生制动能量回收模块。技术原理方面,伺服电机(额定转速3000r/min,扭矩控制精度 $\pm 1.5\%$)与双向齿轮泵(排量10mL/r,容积效率 $> 92\%$)直接耦合,取消传统阀控系统的节流阀组,形成“电机-泵-执行器”直驱回路;压力转速解耦算法基于泵的扭矩-压力数学模,将系统压力控制转化为电机扭矩控制,配合转速环PID调节(带宽50Hz)实现流量的精准供给;再生制动模块在执行器下行时(如挖掘机动臂下放),利用负载势能驱动电机进入发电状态,通过能量回馈单元将电能转化为电网可用的交流电(转换效率 $> 90\%$)^[5]。

节能机制主要体现在:容积式传动取消了阀控节流环节,彻底消除了传统系统中占比达25%的节流损失;伺服电机采用按需启停控制策略,当执行器处于静止状态时电机完全停转,系统待机功耗降至0.5W以下;再生制动能量回收系统在重力负载工况下的能量回收率

达80%，显著减少了液压系统对动力源的能量需求。以三一重工电动挖掘机SY19E为例，采用EHA技术替换传统主阀+变量泵方案后，作业过程中液压系统能耗降低45%，平均每小时耗电量从12kWh降至6.6kWh；同时，由于取消了传统液压阀的高频换向噪声源，整机噪声水平从85dB(A)下降至70dB(A)，液压油温升幅减少20℃，延长了液压元件的使用寿命。

3. 基于数字孪生的模型预测控制 (MPC)

通过构建液压系统的数字孪生体，集成深度学习预测模型与滚动优化算法，实现以系统总功耗最小化为目标的泵阀协同控制策略。技术原理包括三个方面：其一，数字孪生体构建，利用Unity3D建立液压系统三维物理模型，结合MATLAB/Simulink搭建包含200+液压元件子模型的液压回路数学仿真模型（压力/流量仿真精度>95%），通过部署在边缘计算节点的高精度传感器（压力传感器精度±0.2%FS，流量传感器响应频率100Hz）实时采集系统状态数据（包含压力、流量、温度、电机转速等50+参数），经数据清洗后同步至数字孪生模型，实现物理系统状态的1:1实时映射；其二，集成基于LSTM的深度学习预测模型（训练数据量达10万小时工况数据），对未来500ms内的负载工况（压力需求、流量波动）进行预判，预测误差<5%；其三，滚动优化控制，以10ms为控制周期，将泵转速（调节范围500-3000r/min）和阀开度（0-100%）作为控制变量，以系统总功耗（电机功率+阀损耗功率）最小化为目标函数，结合数字孪生模型预测的负载需求，通过动态规划算法求解最优控制序列，实现泵阀协同的节能优化。

在海天注塑机智能工厂项目中，部署该数字孪生平台后，吨制品液压系统能耗从350kWh下降至252kWh，能耗降幅达28%；压力控制精度从±1.2MPa提升至±0.72MPa，控制精度提升40%；通过预测模型提前调整泵阀参数，减少了注塑过程中压力过载现象，模具损耗率降低30%，同时系统响应时间从80ms缩短至50ms，显著提升了生产效率。该方法通过数字孪生体的实时仿真与预测控制，实现了液压系统从经验控制到数据驱动精准控制的转变，尤其适用于多工况切换频繁、负载特性复杂的工业液压场景^[6]。（见表2）

表2 三大策略对比分析表

维度	数字阀PWM控制	EHA变压力控制	数字孪生MPC控制
核心节能环节	阀控系统	动力源+能量回收	全局系统优化
节能量级	20%-35%	30%-50%	25%-40%
响应速度	毫秒级	10-50ms	秒级 (含预测时域)
适用系统复杂度	低-中	中	高
改造成本	★★☆ (中等)	★★★ (较高)	★★☆ (软硬件协同)

结束语

液压压力控制系统的节能控制通过数字液压阀与高频PWM协同控制、电动静液执行器变压力控制、基于数字孪生的模型预测控制等策略的应用，实现了压力流量的精准匹配与能量回收利用。在精密注塑机、机床液压夹具系统、电动挖掘机、注塑机智能工厂等实际应用场景中，展现出显著的节能效果，能耗降低幅度达25%~45%，压力控制精度提升约40%。这些技术突破了传统阀控系统节流损失大、效率低的瓶颈，兼具降低能耗成本的经济价值与契合CO₂减排政策的环保意义。

参考文献

[1]明巧红,王阳阳.挖掘机负载敏感液压系统电控节能方案研究[J].工程机械,2024,55(3):181-188+14.

[2]桑勇,岳亦锋,李国锋,刘伟崑,曹旭阳,王海洋.正流量液压挖掘机回转系统节能控制[J].液压气动与密封,2024,44(1):1-8.

[3]王萌.基于自抗扰技术的挖掘机协同控制系统的研究与设计[D].河北工程大学,2022.5-6.

[4]曾亿山,吕安庆,赵志学,刘旺,刘常海,胡敏.挖掘机先导控制负载敏感液压系统节能特性研究[J].液压与气动,2022,46(2):39-46.

[5]骆煜.车载泵送系统功率节能匹配的研究[J].建设机械技术与管理,2020,33(4):91-93+98.

[6]柳渊.锻造机新型液压系统节能与快速建压控制研究[D].太原科技大学,2020.5-6.