

# 液压传动系统的节能设计探讨

付少伟 崔玉玺

河南中孚高精铝材有限公司 河南 郑州 451200

**摘要:** 液压传动系统被广泛应用于工程机械、航空航天、冶金、船舶、注塑机械及自动化生产线等众多工业领域。然而,传统液压系统普遍存在能量转换与传输效率偏低、节流与溢流损失严重、系统发热大等问题,导致其能耗居高不下,不仅增加了运行成本,也与当前全球倡导的“双碳”战略目标相悖。本文系统性地探讨了液压传动系统节能设计的核心理念与关键技术路径。首先,剖析了传统液压系统的主要能量损失机理;其次,重点阐述了负载敏感系统、变量泵控系统、二次调节系统、能量回收与再利用技术以及智能化控制策略等先进节能技术的原理、优势与应用;最后,结合系统集成优化与未来发展趋势,提出了构建高效、绿色、智能液压传动系统的综合设计框架。研究表明,通过多维度、系统化的节能设计,可显著提升液压系统的整体能效,为工业领域的节能减排提供有力支撑。

**关键词:** 液压传动; 节能设计; 能量损失; 负载敏感; 变量泵控; 能量回收; 智能控制

## 引言

在全球能源危机与环境问题日益严峻的背景下,节能减排已成为世界各国工业发展的核心战略。作为现代工业的“肌肉”与“神经”,液压传动技术在国民经济中扮演着不可或缺的角色。据统计,在部分重工业领域,液压系统的能耗可占到设备总能耗的60%以上。然而,传统定量泵-溢流阀构成的节流调速回路,其固有的“大马拉小车”式工作模式,导致了巨大的能量浪费。系统在大部分工况下,并非工作在最佳效率点,而是通过溢流阀将多余的压力油排回油箱,或通过节流阀将压力能转化为热能,造成严重的能量损失和系统温升。这种高能耗、低效率的现状,不仅增加了企业的运营成本,缩短了设备的使用寿命,也对环境造成了负面影响。因此,对液压传动系统进行节能化设计与改造,不仅是技术进步的必然要求,更是实现可持续发展的关键举措。

## 1 液压传动系统能量损失机理分析

要实现有效的节能设计,首先必须清晰地认识系统内部的能量损失来源。液压系统的能量损失主要可归纳为以下几类:

### 1.1 容积损失(泄漏损失)

容积损失是指由于液压元件内部存在间隙,导致高压油液向低压区或油箱泄漏,从而减少了有效输出流量。主要发生在液压泵、液压马达、液压缸及各种阀类的配合间隙处。容积损失与工作压力、油液粘度、元件磨损程度及制造精度密切相关<sup>[1]</sup>。虽然容积损失直接表现为流量的减少,但为了维持系统所需的流量,泵必须提供更大的理论流量,间接增加了驱动电机的能耗。

### 1.2 机械损失(摩擦损失)

机械损失源于液压元件运动部件之间的机械摩擦,如泵和马达的轴承、柱塞与缸体、滑靴与斜盘等处的摩擦。这部分能量最终转化为热能散失。机械损失与转速、负载、润滑条件及元件结构设计有关。

### 1.3 压力损失(流动损失)

压力损失是液压系统中最为显著且可优化空间最大的能量损失形式,主要分为两类:①沿程压力损失:油液在管道中流动时,因粘性摩擦而产生的压力降。其大小与管路长度、内径、油液流速及粘度成正比。②局部压力损失:油液流经阀口、弯头、接头、滤油器等局部障碍时,因流速大小和方向的急剧变化而产生的涡流和撞击所造成的压力降。节流阀、方向阀等控制元件是局部压力损失的主要来源。

### 1.4 节流与溢流损失(系统匹配损失)

这是传统定量泵系统中最核心、最严重的能量浪费形式,属于系统层面的能量不匹配损失。①溢流损失:在定量泵-溢流阀系统中,泵的输出流量是恒定的。当执行机构所需流量小于泵的输出流量时,多余流量必须通过溢流阀流回油箱。此时,泵的输出压力等于溢流阀的设定压力,系统消耗的功率为 $p = P * Q_{pump}$  ( $P$ 为溢流压力,  $Q_{pump}$ 为泵的恒定流量),而执行机构实际消耗的功率仅为 $P * Q_{load}$  ( $Q_{load}$ 为负载所需流量)。两者之差( $P * Q_{pump} - P * Q_{load}$ )即为溢流损失,这部分能量全部转化为热能。②节流损失:当执行机构需要调速时,通常采用节流阀(进油或回油节流)来控制流量。节流阀前后会产生压差 $\Delta p$ ,通过节流阀的流量为 $Q$ ,则节流损失功率为 $\Delta p * Q$ 。这部分能量同样转化为热能。在复合动作或负载变化剧

烈的工况下, 节流损失尤为严重。

综上所述, 液压系统的总效率 $\eta_{\text{total}}$ 是容积效率 $\eta_v$ 和机械效率 $\eta_m$ 的乘积, 即 $\eta_{\text{total}} = \eta_v \cdot \eta_m$ 。对于整个传动系统而言, 其有效输出功率与输入功率之比还受到系统匹配效率的极大影响。因此, 节能设计的关键在于从元件、回路和系统三个层面入手, 最大限度地减少上述各类损失, 特别是系统匹配损失。

## 2 液压传动系统节能设计关键技术路径

针对上述能量损失机理, 业界和学术界发展了一系列行之有效的节能技术。这些技术从不同角度切入, 共同构成了液压系统节能设计的技术体系。

### 2.1 负载敏感 (LS) 系统

负载敏感 (LS) 系统是解决节流损失和溢流损失的经典方案, 其核心思想是“按需供能”, 由一个负载敏感泵 (通常是变量柱塞泵) 和一个负载敏感多路阀构成, 工作原理为负载敏感多路阀的每个联都带有压力补偿器 (LS阀), 能感知执行机构 (油缸或马达) 的负载压力 $P_{\text{load}}$ , 并通过LS信号管路反馈给变量泵的排量控制机构, 变量泵自动调节排量, 使其输出压力 $P_{\text{pump}}$ 始终略高于所有正在工作的执行机构中的最高负载压力 $P_{\text{max}}$ , 即 $P_{\text{pump}} = P_{\text{max}} + \Delta P_{\text{ls}}$  ( $\Delta P_{\text{ls}}$ 为15-30 bar的恒定小压差)<sup>[2]</sup>。其节能优势显著, 一是消除溢流损失, 泵的输出流量始终等于所有执行机构所需流量之和, 无多余流量溢流, 二是消除节流损失, 泵压与最高负载压力间仅维持恒定小压差, 无论执行机构负载如何变化, 流过控制阀口的压差 $\Delta P$ 都恒定, 控制阀仅分配流量, 不再承担建立压差功能, 几乎完全消除传统节流调速中的节流损失, 三是具有良好复合动作性能, 多个执行机构同时动作时, LS系统能自动将流量优先分配给负载较低的执行机构, 实现功率合理分配; LS系统在挖掘机、起重机等工程机械上得到广泛应用, 节能效果显著, 通常可比传统定量泵系统节能20%-40%。

### 2.2 变量泵控系统

变量泵控系统作为另一种“按需供能”的高级形式, 直接通过改变泵的排量来控制执行机构的速度, 彻底摒弃了节流阀, 其主要类型包括广泛应用于船舶舵机、轧机压下等需要大功率、高精度控制场合的泵控马达系统, 该系统通过双向变量泵直接驱动定量或变量马达, 实现马达的无级调速和换向, 且无节流损失、效率极高; 以及技术难度相对较高、因油缸两腔容积不等需解决“流量匹配”问题的泵控油缸系统 (容积调速), 常见解决方案有采用不对称油缸、增加补油/泄油回路或使用双泵/多泵系统, 近年来随着数字液压技术和高频响

伺服比例泵的发展, 其在注塑机、压力机等领域的应用日益增多, 该系统节能优势显著, 具有无节流损失这一最根本的优势, 且在理想工况下泵的输出流量与执行机构需求严格匹配, 无溢流损失, 同时系统刚性好、响应快, 因没有节流口的阻尼作用而具有更优的动态响应性能。

### 2.3 二次调节静液传动系统

二次调节静液传动系统是一种更为先进的能量管理技术, 其核心元件是通常为可调斜盘轴向柱塞泵/马达的二次元件, 它兼具吸收与释放能量的功能。系统工作时, 由恒压变量泵 (一次元件) 维持恒定的系统压力 (共用压力管路), 二次元件直接与负载相连, 通过调节其斜盘倾角可控制排量, 进而控制负载的转速和扭矩; 当负载处于制动或下降状态时, 二次元件可充当泵, 将负载的势能或动能转化为液压能, 经共用压力管路输送给其他作为马达工作的二次元件使用, 或储存到蓄能器中<sup>[3]</sup>。该系统节能优势显著, 其最突出特点是能高效回收制动能量和势能, 并在系统内部实现能量的实时交换与再利用; 在多执行机构系统中, 能量可在各执行机构间直接流动, 避免了“电-液-电”或“液-热”多次转换损失, 系统效率高; 且多个二次元件可共享同一个一次元件和压力管路, 系统结构紧凑。目前, 二次调节系统已在港口起重机、电梯、车辆制动能量回收等领域展现出巨大的节能潜力。

### 2.4 能量回收与再利用技术

除了二次调节系统, 还有多种专门针对特定工况的能量回收技术。①势能回收: 在提升重物后下降的工况 (如芯轴涨缩、卷材提升), 负载的重力势能可以通过液压马达或变量泵回收, 并储存到蓄能器或电池中。当需要提升重物时, 再利用储存的能量辅助驱动, 从而大幅降低净能耗。②制动动能回收: 在车辆或移动机械制动时, 利用液压泵将车辆的动能转化为液压能储存起来。③蓄能器的应用: 蓄能器是液压系统中重要的储能元件。在系统需求功率峰值时, 蓄能器可以与泵共同供油, 从而允许选用功率更小的电机和泵, 实现“削峰填谷”, 降低装机功率。在能量回收回路中, 蓄能器是储存回收能量的关键部件。

### 2.5 智能化与数字化控制策略

随着传感器技术、微处理器技术和先进控制算法的发展, 智能化控制为液压系统节能开辟了新途径。①预测性节能控制: 基于对工作循环的预知 (如注塑机、压力机的固定循环), 控制器可以提前规划泵的输出, 使其在非工作阶段 (如保压、冷却) 将压力和流量降至最低, 甚至进入待机休眠状态。②自适应控制: 系统能实

时感知负载变化和工况，并自适应地调整控制参数（如LS压差、泵的响应特性），使系统始终运行在最佳效率点。③数字液压技术：采用高速开关阀、数字泵/马达等元件，通过脉宽调制（PWM）或脉码调制（PCM）等方式精确控制流量和压力。数字元件具有响应快、抗污染能力强、易于与计算机集成等优点，能够实现更精细的能量管理。④状态监测与健康诊断（PHM）：通过监测油温、压力、流量、振动等参数，可以评估系统效率，及时发现因元件磨损、油液污染等导致的效率下降问题，并进行预防性维护，保证系统长期处于高效运行状态。

### 3 系统集成与综合优化设计

节能设计不应局限于单一技术的应用，而应是一种系统性的工程思维。高效的节能液压系统是多种技术协同优化的结果。

#### 3.1 元件层面的优化

一是选用高效率元件：优先选择容积效率和机械效率更高的新型液压泵、马达和阀。例如，采用斜盘式或斜轴式变量柱塞泵替代齿轮泵。二是优化管路设计：合理规划管路走向，缩短管路长度，增大管径，减少弯头和接头数量，以降低沿程和局部压力损失<sup>[4]</sup>。三是油液管理：选用粘温特性好、清洁度高的液压油，并配备高效的过滤和冷却系统，以维持油液的最佳工作状态，减少因粘度不当或污染造成的额外损失。

#### 3.2 回路层面的优化

一是合理选择系统形式：根据具体应用工况（负载特性、动作要求、功率等级）选择最合适的系统形式。对于多执行机构、负载变化大的场合，LS系统是优选；对于单执行机构、高精度控制的场合，泵控系统更具优势。二是采用闭式回路：闭式回路（泵和马达直接构成回路）省去了油箱和大部分管路，减少了泄漏和压力损失，且补油泵功率小，整体效率高于开式回路，常用于行走驱动系统。

#### 3.3 系统层面的集成

一是机电液一体化设计：将液压系统视为整个装备的一个子系统，与电气、机械部分进行协同设计。例如，通过优化机械结构来降低负载惯量，从而减小液压系统所需功率。二是混合动力技术：将液压系统与电气系统结合，形成液压-电气混合动力系统。在需要大功率短时输出的场合（如长行程大流量液压缸的升降、涨缩动作），由液压系统提供峰值功率；在常规行驶或低负载工况下，由电动机驱动。两者优势互补，实现全局最优能效。

### 4 结语

液压传动系统节能设计是复杂系统工程，本文深入剖析能量损失机理，阐述了负载敏感、变量泵控、二次调节、能量回收技术及智能化控制策略等核心节能路径。实践表明，科学应用并集成优化这些技术，可显著提升能源利用效率，降低成本与碳排放。展望未来，其节能设计将深化发展：深度融合智能化，借助AI和大数据实现能效预测、故障诊断与自主优化，从“节能”迈向“智节”；新材料与新工艺将用于制造高效轻量化元件，减少源头损失；节能元件标准化与模块化设计将加速普及应用，降低集成复杂度与成本；全生命周期能效评估将关注各阶段环境影响，推动液压技术向绿色、可持续方向迈进。

### 参考文献

- [1]李富梅.液压传动系统中的节能措施研究[J].世界有色金属,2020,(24):171-172.
- [2]晁阳.论大功率液压机械传动系统的节能方法[J].现代制造技术与装备,2020,(02):129-130.
- [3]杜爱春.液压传动系统中的节能技术探究[J].发明与创新(职业教育),2019,(12):112.
- [4]雷长勇.液压传动系统中节能技术的探讨[J].科技创新,2018,(29):194-195.