

# 多工位全自动浇注机液压系统节能控制技术研究

何燮锋

浙江文源科技智能有限公司 浙江 绍兴 312000

**【摘要】**：多工位全自动浇注机作为铸造核心装备，其传统液压系统因定量泵节流调速模式存在严重能效瓶颈，本文旨在通过深度理论分析构建节能控制框架：首先基于流体力学与能量守恒剖析能耗根源，进而阐述负载敏感、变频驱动及蓄能器回收等关键技术的动态机理，构建工况匹配的变量泵控与电液比例复合逻辑；研究重点揭示多执行机构并联回路的流量耦合与压力抑制规律，论证智能算法在按需供油中的核心作用，从而在不依赖实验数据的前提下，阐明系统节能的物理本质与逻辑路径，为绿色铸造装备研发提供坚实的理论支撑。

**【关键词】**：多工位浇注机；液压系统；节能控制；负载敏感；变频驱动；能量回收；按需供油

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.015

## 1 引言

在现代制造业绿色化转型背景下，铸造行业面临严峻的节能减排压力。多工位全自动浇注机作为提升铸件质量与效率的关键设备，其液压系统因高频启停、负载多变及多机构协同等特点，成为整机能耗核心。传统恒压或定量泵系统存在严重的溢流与节流损失，尤其在多工位负载差异大及势能制动工况下，能量利用率极低且缺乏回收机制。

尽管负载敏感、变频驱动及蓄能器回收等新技术提供了按需供能与能量循环的解决思路，但将其集成应用于多工位浇注机仍属复杂系统工程，需攻克多源耦合下的动态稳定性难题。当前学术界虽在通用液压节能领域成果丰硕，但针对多工位浇注机特定工艺的系统性理论研究尚显不足，缺乏对协同工况下能量流动规律的抽象及完善策略体系。

鉴于此，本文采用理论分析与逻辑推演方法，深入探讨多工位全自动浇注机液压系统节能控制技术。研究首先阐释传统系统的能耗机理，继而剖析负载敏感、变频驱动及势能回收的核心模型与动态特性，构建多技术融合的复合节能控制逻辑，并提出优化策略。本文旨在为系统升级提供严谨的理论范式，填补多工位协同节能理论空白，推动铸造装备向高效、绿色、智能化方向发展。

## 2 多工位浇注机液压系统能耗机理与损耗分布

### 2.1 节流调速与溢流损失的流体力学本质

传统液压系统主要靠节流调速控制执行机构速度，原理是改变节流口通流面积调节流量。根据伯努利方程与孔口流量公式，流体流经节流口的压差与流量之积就是节流功率损失。在多工位浇注机中，倾转机构等低速精细操作时，比例阀开口小，泵出口压力与负载压力压差大，大部分液压能转化为热能耗散于阀口，降低效率，还使油温升高、粘度下降、泄漏增加，形成恶性循环。

溢流损失是恒压系统另一大能耗源。为应对最大负载，溢流阀设定压力常远高于实际平均工作压力。当多工位总流量需

求小于泵额定流量，或某工位保压无需流量时，多余流量经溢流阀高压回流。理论分析显示，溢流功率损失等于溢流压力与流量之积。在浇注机完整循环中，空载快移、慢速定位及保压等待阶段占比大，实际负载压力远低于设定值且流量波动大，导致“大马拉小车”现象，溢流损失占总能耗比例高。

从能量转换看，节流与溢流损失本质是高品质液压能向低品质热能的无效退化。因多工位负载独立且随机，“恒压源 + 节流阀”模式难找到兼顾所有工位且无过剩压力的平衡点。逻辑推导表明，采用该模式，压力匹配不当引起的能量损失是结构性的。所以，根本性节能需打破恒压供油束缚，建立压力与流量随负载动态变化的新型供油机制。

### 2.2 多工位协同动作中的压力耦合与流量冗余

多工位浇注机的复杂性在于多执行机构需同时或顺序动作，且负载特性差异大，行走机构负载平稳，倾转浇包机构力矩变化剧烈且有重力负载特征。传统并联回路中，所有机构共享同一压力源，系统压力需提升至满足最大负载支路需求，导致低负载支路通过节流阀消耗多余压力。理论分析表明，这种压力耦合机制会引发流量冗余与压力失配。高、低负载工位同时动作时，系统压力升高满足高负载会使低负载工位节流损失剧增，反之高负载无法工作，多工位复杂工况下系统长期处于非最优压力匹配状态。此外，泵流量按所有工位最大速度之和设计，但实际全速概率低，大部分时间输出流量大于需求，导致大量溢流浪费。更深层问题是动态能量冲击，工位突停或换向时，流体惯性引发压力尖峰触发溢流阀瞬时开启，造成高能排放；时序切换导致负载阶跃变化，传统系统提高压力设定裕度保稳定，加剧常态浪费。多工位能耗包含耦合效应产生的额外损耗。因此，节能策略需考量多工位动态交互，通过解耦控制或独立驱动消除压力耦合负面影响，实现按需供油。

## 3 基于负载敏感理论的变量泵控节能机制

### 3.1 负载敏感系统的压力跟随与流量匹配原理

负载敏感控制通过闭环反馈机制解决传统系统的能耗痛

点。其核心逻辑是将泵出口压力设定为略高于最高负载压力一个恒定差值，并使输出流量自动匹配执行机构需求。系统利用梭阀网络选取所有执行机构中的最高负载压力反馈至变量泵调节器，调节器据此调整斜盘倾角改变排量。逻辑推演表明，泵的输出压力随负载实时浮动：负载升高则泵压升高，负载降低则泵压降低，始终保持两者差值恒定。这种“压力跟随”机制彻底消除了因压力设定过高产生的溢流损失；同时，泵输出流量严格等于需求流量，理论上无多余流量溢流。虽然维持阀口驱动仍需一定压差，但该压差被控制在最小必要值，使节流损失大幅降低。在多工位浇注机中，该机制实现了从“源端高压恒定”到“源端压力自适应”的范式转变，确保无论负载如何波动，泵输出功率始终紧密跟踪负载需求，使系统始终工作在高效区。

### 3.2 多路阀压力补偿与流量独立性的动态保障

在多工位并联共享变压力源的架构下，确保各执行机构动作独立性至关重要。若无补偿机制，负载变化引发的系统压力波动会导致流量不稳定，产生“抢流量”等动作干涉。为此，系统在各支路配置压力补偿器，其作用是维持控制阀口前后压差恒定。无论泵出口压力随最高负载如何波动，或各支路负载压力如何变化，压力补偿器均能自动调节开口，抵消压力扰动，确保流过主阀口的流量仅取决于阀口开度而与负载无关。逻辑推演显示，当某工位负载突变导致系统压力上升时，其他工位的补偿器会自动关小以增加阻力，保持自身阀口压差不变，从而稳定速度。这种机制实现了流量与压力的解耦，保障了多工位协同作业的精准性。此外，补偿器的动态响应特性需精确匹配，既要避免高频振荡，又要及时抑制负载扰动，确保平滑过渡。

### 3.3 梭阀网络逻辑与系统动态稳定性分析

负载敏感系统的效能高度依赖于梭阀网络的逻辑设计与动态响应。梭阀网络负责从多个执行支路中快速、准确地筛选出最高负载压力并反馈给泵控调节器，这是实现“压力跟随”的前提。理论分析指出，若梭阀网络存在延迟、泄漏或逻辑错误，将导致反馈压力失真，进而引发泵输出压力过高或过低。特别是在多工位浇注机复杂工况下，负载切换频繁，梭阀网络必须具备极快的响应速度以捕捉瞬态最高负载。同时，整个闭环系统的稳定性受补偿器弹簧刚度、阻尼特性及阀芯质量等多重因素影响。若参数匹配不当，可能在负载突变时引发系统高频振荡或低频爬行，破坏流量独立性甚至危及设备安全。因此，构建严密的理论模型以优化梭阀逻辑与补偿器动态参数，是确保多工位系统在节能模式下稳定运行的关键，也是实现真正意义上“按需供油”的逻辑基石。

## 4 变频驱动技术与电液复合系统的能效优化

### 4.1 电机转速调节与泵流量输出的非线性映射

变频驱动液压系统通过调节电机转速控制泵的输出流量，依据流体机械相似定律，泵流量与转速成正比，而驱动功率与转速的三次方成正比。逻辑推演表明，利用降速来减少流量输出，其节能效果显著优于传统变量泵的排量调节。特别是在多工位浇注机的空载快回、保压或待机阶段，系统流量需求极低甚至为零，变频控制器可指令电机低速旋转或停转，从源头切断能量输入，彻底消除异步电机恒速运行时的铁损、铜损及机械摩擦损耗。相比之下，传统负载敏感系统在零流量时虽泵排量为零，但电机仍全速运转，存在不可忽视的空载能耗。因此，变频技术在理论能效上限上更具优势。然而，电机转动惯量导致的转速响应滞后是多工位快速切换工况下的主要挑战。解决之道在于建立精确的“转速 - 流量”非线性映射模型，并引入前馈控制策略，通过预测动作时序提前调整转速，以弥补动态响应不足，同时需合理设计压力缓冲机制，防止因转速调节滞后引发的压力超调。

### 4.2 电液比例复合控制策略与动态响应特性

为兼顾变频系统的高能效与变量系统的快响应，电液比例复合控制系统成为理想方案。该架构通常由变频电机驱动变量泵，形成“电机转速粗调、泵排量细调”的双自由度控制模式。逻辑推演显示，在稳态或慢变工况下，系统优先调节电机转速至高效区间，并使变量泵保持最大排量以获得最佳容积效率；而在瞬态高频扰动或负载突变时，变量机构迅速动作以补偿流量缺口或吸收压力冲击，电机转速则缓慢跟进。这种分工协作机制既满足了多工位浇注机对动作精准性与快速性的严苛要求，又最大化了全工况下的系统能效。此外，复合控制还能有效抑制单一变频系统在低压大流量或高压小流量极端工况下的效率衰减问题，确保系统始终运行在最优效率曲面上，实现动态性能与节能效果的完美平衡。

### 4.3 电子负载敏感（ELS）技术的智能化演进

电子负载敏感（ELS）技术代表了液压控制的最高形态，它摒弃了传统的机械式梭阀网络与反馈油路，转而利用高精度压力传感器采集各支路负载数据，由中央控制器通过算法实时解算最高负载压力，并直接输出电信号协同控制电机转速与泵排量。从控制理论分析，ELS系统消除了机械反馈环节的滞后、摩擦与非线性干扰，具有极高的灵活性与智能化潜力。对于多工位全自动浇注机，ELS不仅能实现极致的按需供油，还能根据预设的工艺曲线（如倾转浇包的特定速度 - 压力轨迹）进行开环与闭环结合的优化控制，实现多工位动作的平滑衔接与无冲击切换。逻辑上，ELS系统将液压控制从“被动适应负载”提升至“主动规划能量”，支持故障自诊断、自适应参数整定及远程云端优化，是构建未来绿色、智能铸造装备的核心技术路径，

为多工位复杂工况下的能效优化提供了无限的理论拓展空间。

## 5 势能回收与蓄能器辅助系统的能量循环利用

### 5.1 重力势能捕获与液压马达再生制动机制

多工位全自动浇注机的倾转复位与负载下降过程蕴含巨大重力势能，传统系统常将其转化为热能耗散。逻辑推演表明，通过液压再生制动技术可将此势能高效回收。在下降或复位工况下，控制液压缸或马达进入泵工况，将重力势能转化为高压液压能，经单向阀或逻辑阀组导入蓄能器储存，而非直接回油箱。蓄能器作为“能量蓄电池”，可在后续加速或提升动作中释放能量辅助主泵，显著降低电机峰值功率与总能耗。回收效率取决于回路压力等级与蓄能器配置，需设计合理的压力分级切换逻辑以匹配充气曲线，并利用电液比例阀精确调节再生流量，防止负载突变引发的失速或吸空，确保动作平稳且回收率最大化。

### 5.2 蓄能器容积配置与释能辅助的逻辑模型

蓄能器兼具能量存储、功率放大与脉动阻尼功能。针对合模或紧急倾转等瞬时大流量需求，利用蓄能器释能可避免主泵与电机过度选型，使其长期运行于高效区。理论分析指出，蓄能器有效容积需依据单次动作能量需求、允许压力波动范围及循环频率综合确定；预充气体压力则决定了有效工作区间，需

在储油量与释放压力间取得平衡。更关键的是建立蓄能器与主泵的耦合控制逻辑：系统检测到高流量需求时，迅速开启出口阀实现并联供油；低需求阶段则关闭出口并利用余流充电。这种智能调度机制要求控制系统具备高实时性与预测能力，通过优化充放电策略平抑负荷波动，延长元件寿命，推动系统从“被动耗能”向“主动节能”跨越。

## 6 结论

本文剖析多工位全自动浇注机液压系统能耗机理，构建从理论瓶颈到多元策略集成的逻辑链条。研究表明，传统恒压节流系统的结构性溢流与节流损失是能效瓶颈。节能机理方面，负载敏感技术“压力跟随”“流量匹配”消除冗余，变频驱动用转速调节降低空载及部分负载损耗，蓄能器系统回收重力势能实现能量循环与削峰，三者互补递进。控制策略上，电液比例复合控制与电子负载敏感（ELS）系统优势显著，多自由度协同保障多工位动作独立性与动态响应，实现全工况最优能效匹配。未来，节能系统将向智能化、集成化发展，依托先进传感与算法精准预测和实时优化能量流。总之，浇注机液压节能是复杂系统工程，需基于对损耗机理的理解。本文理论框架为绿色智能铸造装备研发提供指引。后续研究应深化多物理场耦合动态特性探索，加速新型元件与算法工程化应用，助力铸造行业“双碳”目标，让节能液压技术推动制造业高质量发展。

## 参考文献：

- [1] 王彩燕. 机械液压系统节能设计与控制策略研究[J]. 模具制造,2026,26(1):40-41,44.
- [2] 胡细东,谭武中. 自动倾转浇注机液压控制系统设计与研究[J]. 机床与液压,2013,41(10):105-108.
- [3] 崔瑞奇,肖阿红.几种常见浇注机的结构特点及应用现状[J].中国铸造装备与技术.2005,(6).5-6.
- [4] 邓伟,宋仲模,雷基林,等. 铝合金缸体低压铸造浇注系统优化研究[J]. 特种铸造及有色合金,2025,45(10):1522-1528.