

液压系统响应特性的建模与控制策略分析

喻会福 刘培 练昊

贵州航天天马机电科技有限公司 贵州遵义 563000

摘要: 在工业生产蓬勃发展的当下, 液压系统凭借其高功率密度、精确控制等优势, 广泛应用于各类关键设备。其响应特性直接关系到系统运行的稳定性、准确性与高效性, 成为决定工业生产质量与效率的核心要素。本文深入剖析液压系统响应特性, 系统梳理建模方法, 全面探讨控制策略, 通过前沿理论与创新思路, 为提升液压系统性能开辟新路径, 助力工业领域实现更高质量发展。

关键词: 液压系统; 响应特性; 建模; 控制策略

引言

液压系统宛如工业机械的“动力心脏”, 在航空航天、重型机械制造、智能装备等多领域发挥着不可替代的作用。从飞机起落架的精准收放, 到大型液压机的强力压制, 其高效稳定运行至关重要。而响应特性作为衡量液压系统动态性能的关键指标, 直接影响设备对指令的跟随速度与精度。面对日益复杂的工况与严苛的性能需求, 深入开展建模与控制策略研究, 已成为突破液压系统性能瓶颈、推动工业技术升级的必由之路。

一、液压系统响应特性基础理论

(一) 响应特性内涵及指标解析

液压系统响应特性指系统在输入信号激励下, 输出量随时间变化的特性。常见指标有上升时间, 即输出量从稳态值的10%上升至90%所需时长, 反映系统响应速度。在诸如注塑机快速合模动作中, 较短上升时间能提升生产效率。超调量, 是输出量超出稳态值的最大百分比, 体现系统稳定性。以航空液压助力转向系统为例, 超调量过大会导致转向过度, 危及飞行安全。调节时间

则表示输出量进入并保持在稳态值 $\pm 5\%$ 误差带内的时间, 综合衡量系统过渡过程的快慢与平稳性。像工业机器人手臂精准定位, 就依赖调节时间短的液压系统。这些指标相互关联又相互制约, 精准解析是优化系统性能的基石。例如, 为追求更快上升时间而过度调整参数, 可能导致超调量增大, 破坏系统稳定性, 所以需在各指标间权衡。

(二) 影响响应特性的系统结构因素

系统结构对响应特性影响深远。泵源作为动力源头, 其排量、转速特性决定了系统供液能力与压力建立速度。大排量泵能在短时间内提供大量油液, 适用于需快速响应的工况, 如汽车起重机快速举升作业。管路布局中, 管径大小、长度及弯曲程度影响液流阻力与压力损失, 长而细的管路易引发压力波动与响应延迟。在大型船舶液压推进系统中, 过长管路会使指令响应滞后, 影响船舶操控性。执行元件的类型(如液压缸、液压马达)及负载特性, 决定了输出力或扭矩与速度的匹配关系, 重载下系统响应往往更迟缓。如冶金行业的大型轧钢机, 巨大负载使液压系统响应难度增加。深入剖析结构因素, 有助于针对性优化系统设计, 例如通过合理加粗管路、缩短长度, 改善系统响应。

(三) 工作介质特性与响应特性关联

工作介质是液压系统能量传递的载体, 其特性直接左右响应特性。油液黏度影响液流的内摩擦力, 黏度过高会增大流动阻力, 降低响应速度, 且易导致油温升高, 如在寒冷冬季, 室外作业的液压挖掘机因油液黏度大启动困难且动作迟缓。黏度过低则会增加泄漏, 削弱系统刚性, 在高压液压机中, 黏度低的油液易从密封处泄漏,

作者简介:

喻会福(1982.10), 男, 苗族, 贵州遵义人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 航天地面装备总体技术研究, 液压系统应用研究, 保障装备总体技术研究。

刘培(1997.12), 女, 汉族, 贵州毕节人, 硕士, 设计师, 研究方向: 机械结构。

练昊(1998.3), 男, 汉族, 山东菏泽人, 本科, 设计师, 研究方向: 机械设计制造及自动化。

影响压力保持。介质的压缩性也不容忽视，在高压、高频工况下，可压缩性引发的压力波动会严重干扰系统响应的稳定性与准确性，像高速液压冲击锤工作时，油液压缩性就需精确考量，否则会导致冲击力度不稳定。需精确考量介质特性以保障系统性能，如根据不同工况选择合适黏度等级的油液。

二、液压系统建模方法研究

（一）基于物理机理的建模思路与流程

基于物理机理建模，从液压系统各元件遵循的物理定律出发，如流体力学中的伯努利方程、牛顿第二定律等。先对泵、阀、缸等元件建立数学模型，描述其输入输出关系，例如泵的排量与转速、压力的关系模型。再依据系统拓扑结构，通过流量连续性方程与压力平衡方程将各元件模型联立，构建完整系统模型。该方法能深入揭示系统内在动态特性，如清晰呈现系统压力波动产生原因。但需精确掌握元件参数，像泵的容积效率、阀的流量系数等，对复杂系统建模难度较大，因为众多元件参数获取与精确测量困难，且实际运行中参数还可能变化。

（二）数据驱动建模技术及优势展现

数据驱动建模借助大量系统运行数据，运用机器学习、统计学等方法挖掘数据背后规律，建立输入输出模型。常见算法有神经网络、支持向量机等。在数控机床液压进给系统中，通过收集大量工况下的输入指令与实际位移数据，利用神经网络训练模型，可精准预测系统响应。相比物理机理建模，它无需深入了解系统内部复杂机理，对复杂非线性系统适应性强，能快速利用实时数据更新模型，提升模型准确性与泛化能力，有效应对工况多变的实际场景。例如在不同加工工艺下，数控机床液压系统工况复杂多变，数据驱动模型可根据新数据实时调整，保障系统稳定运行。

（三）混合建模方式的融合策略与效果

混合建模融合物理机理与数据驱动优势。先用物理机理构建基础模型框架，明确系统基本动态特性，确定系统大致的压力、流量变化趋势。再利用数据驱动方法对模型参数进行修正与优化，弥补机理模型因参数不确定性、未建模动态等导致的误差。例如在盾构机液压推进系统中，先用物理机理建立模型，再结合实际掘进过程中的压力、位移数据，利用数据驱动算法优化参数。这种融合策略既能保证模型的物理可解释性，又能显著提升模型精度与适应性，在复杂液压系统建模中展现出

良好应用前景，为盾构机在不同地质条件下稳定推进提供可靠模型支持。

三、常见控制策略对响应特性影响

（一）传统PID控制在响应调节中的表现

PID控制作为经典控制策略，通过比例、积分、微分三个环节对系统误差进行调节。比例环节快速响应误差，提升系统响应速度，在简易液压升降平台中，比例环节能使平台快速启动上升。例如在小型工厂仓库货物搬运中，工人操作液压升降平台，比例环节迅速发挥作用，让平台快速升至所需高度，大大提高搬运效率。积分环节消除稳态误差，提高控制精度，例如在自动化生产线的液压定位装置中，积分作用确保定位精准。像电子元件生产线上，芯片安装设备的液压定位装置依靠积分环节，能将芯片精准放置在指定位置，保障产品质量。微分环节预测误差变化趋势，增强系统稳定性，防止系统振荡。在简单液压系统或工况变化不大场景中，PID控制能实现较好控制效果，如小型液压千斤顶工作稳定。但面对复杂非线性、时变特性系统，参数整定困难，易出现超调大、响应慢等问题。在大型液压振动台模拟复杂振动环境时，传统PID控制难以满足高精度控制要求。因为振动台需模拟的振动波形复杂多样，系统参数随时间和振动状态不断变化，PID控制难以快速准确地调整参数以适应这些变化。

（二）自适应控制策略优化响应特性路径

自适应控制能根据系统运行状态实时调整控制参数，以适应工况变化。模型参考自适应控制通过对比系统实际输出与参考模型输出，自动调节控制器参数，在智能液压钻机中，可根据不同岩石硬度实时调整钻进速度与压力控制参数。当钻机从较软土层钻进到坚硬岩石层时，系统能自动感知并调整参数，保持高效稳定钻进。自校正调节器则依据系统在线辨识的参数，实时更新控制律。这些策略能有效提升液压系统在变负载、变工况下的响应特性，增强系统鲁棒性与适应性。如港口起重机在吊运不同重量货物时，自适应控制确保其稳定运行，避免因负载变化导致的晃动与失控。在港口繁忙作业中，起重机吊运重量从几吨到几十吨不断变化，自适应控制使起重机始终能平稳吊运，保障货物安全装卸，提升港口作业效率。

（三）智能控制（如模糊、神经网络）介入效果

智能控制引入模糊逻辑、神经网络等智能算法，模拟人类思维决策过程。模糊控制基于模糊规则对系统进

行控制，无需精确数学模型，对非线性、不确定性系统控制效果良好。在农业灌溉用的液压喷灌系统中，根据土壤湿度、天气等模糊信息控制喷头压力与流量。在不同季节、不同天气条件下，系统能依据模糊规则自动调整喷灌强度，既保证农作物得到充足水分，又避免水资源浪费。神经网络控制利用其强大的非线性映射能力，通过学习系统输入输出数据，构建高精度控制模型。在高端液压测试设备中，神经网络控制能精确模拟复杂加载工况。二者应用于液压系统，显著改善系统响应速度、稳定性与控制精度，尤其在复杂、强耦合工况下优势凸显，如航空发动机试验台的液压加载系统，智能控制保障了加载精度与系统稳定性。航空发动机试验对加载精度和稳定性要求极高，智能控制能精准模拟发动机运行时的各种复杂工况，为发动机性能测试提供可靠支持。

四、提升响应特性的控制策略创新

(一) 多模态协同控制策略设计要点

多模态协同控制整合多种控制策略优势，针对不同工况、不同控制阶段灵活切换或融合控制方式。例如在系统启动阶段采用快速响应的Bang-Bang控制，接近目标值时切换为PID控制以保证控制精度，遇到突发干扰则引入自适应控制进行调节。在电梯液压升降系统中，启动时Bang-Bang控制使电梯快速上升，接近楼层时PID控制实现平稳停靠，若遇突发阵风干扰，自适应控制调整系统保持稳定。设计要点在于精准划分工况、合理选择控制模态及制定高效切换融合规则，以实现全工况下系统响应特性最优。需综合考虑系统运行环境、负载变化等因素，精确界定工况区间，确保控制策略切换顺畅。

(二) 基于模型预测的先进控制策略探索

模型预测控制利用系统预测模型，根据当前及未来有限时段内的输入输出信息，滚动优化控制序列，使系统输出尽可能接近目标值。在液压伺服压力机中，结合系统动态模型与实时测量的压力、位移数据，提前预测系统响应，优化控制信号，能有效应对系统延迟、干扰等问题，显著提升响应的准确性与快速性，为复杂工况下的液压系统控制提供新思路。如在精密锻造工艺中，模型预测控制确保压力机精准施压，提高锻件质量。通

过不断更新预测模型与优化控制序列，适应锻造过程中材料特性变化等复杂情况。

(三) 引入分布式控制对响应特性的革新

分布式控制将系统控制任务分散至多个子控制器，各子控制器根据局部信息独立决策又相互协作。在大型复杂液压系统中，相比集中式控制，分布式控制减少信息传输延迟与瓶颈，增强系统可靠性与灵活性。在大型船舶动力定位液压系统中，多个子控制器分别控制不同推进器的液压装置，各执行机构可根据自身工况实时调整控制策略，大幅提升系统整体响应速度与协同工作能力，为液压系统响应特性提升带来质的飞跃。当船舶遭遇不同方向海浪冲击时，各推进器能迅速响应，协同保持船舶位置稳定，提升船舶航行安全性与操控性。

结论

混合建模结合智能控制在提升响应特性方面效果显著，多模态协同、模型预测及分布式控制展现出良好应用前景。然而，当前研究仍面临模型精度与实时性平衡、复杂工况下控制策略鲁棒性不足等问题。未来，需深入挖掘新型建模理论与智能算法，加强多学科交叉融合，提升液压系统响应特性研究水平，推动其在高端装备制造等领域的广泛应用。

参考文献

- [1] 寿好芳. 新能源汽车电机控制器液冷散热系统热仿真分析及特性研究[J]. 机床与液压, 2024, 52(20): 205-210.
- [2] 张燕红. 液压泵控马达系统响应特性对比与优化[J]. 装备制造技术, 2024, (08): 45-49.
- [3] 刘杰. 往复式液压增压装置动态响应特性分析[J]. 机床与液压, 2024, 52(09): 123-127.
- [4] 高成龙. 不同煤层硬度下钻孔机器人主钻进液压系统故障诊断方法研究[D]. 中国矿业大学, 2024.
- [5] 韩晶晶, 王强, 张峰. 挖掘机二通插装阀控激振系统换向频率特性研究[J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(03): 236-240.