

基于AMESim的电液比例控制系统动态特性建模与参数优化研究

宋宇宁

营口理工学院机械与动力工程学院 辽宁 营口 115014

摘要: 电液比例控制系统因其经济、节能、维护方便、抗污染能力强、适应大功率控制及具有一定控制精度等特点在工程领域得到了广泛应用。因此,研究电液比例阀控液压缸位置控制系统,尤其是研究系统的动态特性,进而达到提高系统的稳定性、准确性、快速性的目的,对液压系统的设计、开发及应用具有很现实的实用价值。本文结合电液比例控制系统为研究对象,并利用AMESim仿真软件对液压系统进行动态特性建模与参数优化研究。

关键词: AMESim; 电液比例控制; 动态特性建模; 参数优化

AMESim软件多学科系统仿真平台提供机械、液压、气动、热力学、电气和控制等多领域联合仿真能力,允许用户建立复杂工程系统的集成模型并分析稳态/动态性能。

1 AMESim 软件

1.1 核心技术优势。图形化建模环境,通过拖拽预定义元件(如液压阀、机械传动件、控制器)构建系统模型,无需编程即可实现物理系统数学描述。专业模型库支持,内置45+专业库与4500+验证模型,涵盖液压元件设计库(HCD)、热库、动力传动库等,确保仿真准确性。仿真分析能力,动态性能评估:支持瞬态响应、频域分析(Bode图/Nyquist图)、稳定性及模态分析。参数优化:集成正交试验、遗传算法等工具,可自动扫描参数并优化系统性能。

1.2 典型应用场景。汽车工程:新能源汽车热管理系统评估、传动系统振动分析。航空航天:燃油系统动态特性仿真、飞控液压作动器设计。工业装备:工程机械液压系统优化(如泵车换向冲击压力降低52%)。

1.3 操作流程示例。新建系统:选择学科领域模板(如液压系统);搭建模型:从库中拖放元件(如比例阀、液压缸)并连接端口;参数设置:输入结构参数(阻尼孔径、弹簧刚度等)或导入实验数据;仿真分析:执行瞬态/稳态计算,可视化压力、流量等关键指标曲线。

1.4 协同与扩展能力。工具集成:支持与MATLAB/Simulink、Adams等软件联合仿真,实现控制算法协同验证;硬件在环(HIL):生成实时代码连接物理控制器,加速控制策略测试。

2 AMESim 电液比例控制系统建模方法

2.1 电液比例控制系统组成。电液比例控制系统主要

由指令元件、比较元件、电控器(比例放大器)、比例阀、液压执行器及检测反馈元件组成,通过电气信号连续控制液压参数,实现高精度调节。其核心工作原理如下:系统组成,指令元件,生成目标控制信号(如电压/电流),可由PLC或计算机设定程序输入。比较元件,对比指令信号与反馈信号,输出偏差信号至控制器。电控器(比例放大器),将微弱电信号放大至驱动级(0-800mA),并优化信号波形以满足电磁铁需求。比例阀,电-机械转换单元:比例电磁铁将电流线性转换为推力(10-30N/A)。液压放大单元:阀芯位移改变节流口面积,控制流量/压力,精度达微米级。反馈单元(闭环系统):内置位移传感器(LVDT或霍尔元件)实时检测阀芯位置,分辨率0.1 μ m。液压执行器,液压缸/马达接收比例阀输出的压力油,驱动负载运动。检测反馈元件,传感器采集执行器位移/速度等参数,转换为电信号反馈至比较器形成闭环。

2.2 工作原理。信号转换,输入电流驱动比例电磁铁产生电磁力,推动阀芯克服弹簧预紧力位移,位移量与电流成正比。液压参数调节,阀芯位移改变节流口面积(A),依据流量方程

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

调节输出流量(Q)和压力(ΔP)。执行控制,开环系统:输出参数仅取决于输入信号,精度较低。闭环系统:反馈信号与指令信号比较,通过PID算法动态补偿负载扰动,实现纳米级精度控制(如位置误差<0.1%)。

2.3 技术特点。连续比例控制:输出流量/压力与输入信号呈线性关系。抗干扰性:内置压力补偿模块,抑

制负载波动影响。节能高效：较传统阀控系统减少30%元件，降低能耗。

3 AMESim 中如何搭建电液比例控制系统模型

在AMESim中搭建电液比例控制系统模型需遵循系统分解、物理建模、控制集成和参数优化的流程，具体步骤如下：

3.1 模型搭建核心步骤。系统分解与元件选型，电气控制模块：从Signal, Control库拖拽信号源（阶跃/斜坡信号）和PID控制器。比例阀模块：在Hydraulic库中选择电液比例阀模型（如Electro-hydraulic proportional valve），需配置阀芯直径、阻尼孔尺寸等参数。执行机构：添加液压缸/马达模型（Hydraulic库）及机械负载（Mechanical库）。物理连接与参数配置，通过端口连接信号流（电气→阀电磁铁）与液流路径（阀→执行机构）。依据实际设备设置关键参数：比例阀：主阀阻尼孔直径（影响动态响应）、先导阀容积（影响压力建立速度）。液压缸：活塞面积、行程、负载质量。控制策略实现，闭环控制：连接位移/压力传感器反馈信号至PID控制器，与设定值比较生成偏差信号。PID参数整定：使用Control库的PID Tuner模块自动整定；手动调整：比例增益（Kp）提升响应速度，积分增益（Ki）消除稳态误差。

3.2 关键参数优化技巧。主阀阻尼孔直径，减小超调，缩短调节时间，扫描直径（0.5–2mm），观察阶跃响应。PID增益，平衡响应速度与稳定性，频域分析（Bode图）验证相位裕量 $> 45^\circ$ 。先导阀容积，降低压力波动，减小容积至1–5ml。

3.3 仿真验证与进阶。动态特性测试，输入阶跃电流信号，验证阀芯位移-电流线性度及执行器跟踪精度。通过瞬态分析检查负载突变时的压力稳定性。联合仿真（可选），通过Simulink Co-simulation接口集成MATLAB算法，实现自适应控制等复杂策略。建模要点，物理参数真实性：阻尼孔尺寸、弹簧刚度等需与实际阀数据一致；控制闭环完整性：反馈传感器需与实际测量点匹

配；动态验证必要性：阶跃响应超调量应 $< 10\%$ ，调节时间 $< 0.5s$ 。

4 AMESim 电液比例控制系统动态特性分析

基于AMESim的电液比例控制系统动态特性分析需聚焦系统响应速度、稳定性、精度及抗干扰能力等核心指标，主要分析维度如下：

4.1 核心动态特性指标。响应快速性，上升/调节时间：系统输出达到目标值90%所需时间，反映动作灵敏度（如简阀同步系统优化后调节时间缩短37.5%）。

流量/压力建立速度：比例变量泵斜盘摆角动态响应速度受比例阀开度增益、控制活塞直径影响。稳定性与超调，压力/流量超调量：溢流阀主阀阻尼孔直径增大会抑制压力波动，但延长响应时间；阀口开度增益过大会导致斜盘响应超调增大。振荡次数：PID参数整定可减少振荡（如液压调速器振荡减少60%）。跟踪与同步精度，位置跟踪误差：采煤机电液比例闭环PID调高系统显著提升位移控制精度。多缸同步误差：四缸提升系统采用偏差耦合控制算法，通过位移偏差反馈实时调节流量分配，降低同步误差。

4.2 暂态过程特性。阶跃响应特性，负载突变时，结合前馈补偿的模糊PID可降低跟踪误差40%（如爆破扫雷器系统）。比例流量伺服阀响应延迟导致变量泵斜盘摆动滞后。频率响应特性，带宽受限：管道长度与直径增加会降低系统固有频率，延长压力传播时间。相位滞后：油液弹性模量变化引起容腔压力动态延迟，影响高频信号跟踪。

4.3 非线性与扰动因素。非线性环节，阀口流量死区：比例阀零位遮盖量导致低速控制非线性。摩擦负载突变：采煤机滚筒截割煤岩界面时负载阶跃变化引发压力冲击。外部扰动鲁棒性，变载荷工况下，液压缸压力波动影响输出力平稳性（死区体积减小可改善）。油温变化导致粘度下降，增加系统泄漏量，降低控制精度。动态优化效果验证（典型案例）如表1。

表1 动态优化效果验证（典型案例）

| 系统类型 | 优化前指标 | 优化后指标 | 提升幅度 |
|------------|----------------|------------------|---------------------|
| 简阀同步控制系统 | 同步误差 $\pm 4\%$ | 同步误差 $\pm 2.5\%$ | $\downarrow 37.5\%$ |
| 比例溢流阀压力控制 | 压力超调15% | 压力超调8% | $\downarrow 46.7\%$ |
| 阀控马达转速同步系统 | 调节时间0.8s | 调节时间0.5s | $\downarrow 37.5\%$ |

5 AMESim 参数优化方法

在AMESim中进行参数优化需根据仿真目标选择合适方法，主要包含以下四类策略及操作流程：

5.1 手动参数扫描法。单变量扫描，选定目标参数（如比例阀阻尼孔直径），在设定范围内（0.5–2mm）设

置离散值序列，批量运行仿真分析输出响应（如压力波动幅值）。多变量组合，使用Design of Experiments模块生成参数组合矩阵，同步优化阻尼孔径与弹簧刚度等关联变量。

5.2 梯度下降法（局部优化）。参数配置，初始学习

率设为0.1,采用Cosine Schedule策略逐步衰减;启用梯度裁剪(阈值1.0)防止数值爆炸。敏感参数优先,重点优化对目标函数影响显著的参数(如PID增益 K_p 、 K_i),提升收敛效率。

5.3 遗传算法(全局优化)。编码与种群,二进制编码参数(如液压缸活塞直径50mm \rightarrow 110010);初始化种群规模 ≥ 50 ,迭代次数 > 10 。适应度函数设计,以超调量 $\sigma\%$ 和调节时间 t_s 构建评价函数,淘汰低适应度个体,保留Pareto最优解。

5.4 联合仿真优化(高阶集成)。接口配置,通过Simulink Co-simulation连接AMESim与MATLAB,需确保:编译器版本一致(如Visual Studio C++);MATLAB版本低于AMESim(例:AMESim 2021.2 \rightarrow MATLAB 2021a)。混合优化流程,AMESim处理物理参数(如阀芯质量);MATLAB优化控制参数(如PID增益)。优化方法选择指南,快速验证单参数影响,手动扫描法,操作直观,结果可视化强。高精度局部最优解,梯度下降法,收敛速度快,适合凸问题。多参数全局最优解,遗传算法,避免局部最优,鲁棒性强。控制-物理参数协同优化,联合仿真,发挥多工具优势,精度最高。关键注意事项,参数敏感性排序:优先优化学习率 $\alpha >$ 动量因子 $\beta >$ 批量大小,再调整网络结构参数;终止条件:目标函数变化率 $< 1\%$ 或达到最大迭代次数;验证必做:对比优化前后阶跃响应曲线,确保超调量 $\leq 5\%$ 。

6 AMESim 电液比例控制系统实际应用与验证

6.1 控制策略实施方法。复杂算法嵌入,利用AMESim的DYNEXE0接口集成MATLAB/Simulink或C++编写的控制逻辑(如模糊PID、前馈补偿),避免信号库建模复杂性。示例:爆破扫雷器系统结合前馈补偿与模糊PID,负载突变时跟踪误差降低40%。多控制器协同,PLC逻辑验证:集成西门子PLC程序实现挖掘机循环工况的状态控制(如回转定位 \rightarrow 卸料 \rightarrow 复位)。PID自整定:通过内置PID Tuner模块优化增益参数,抑制液压缸压力振荡(振

荡次数减少60%)。

6.2 系统验证方法体系。模型在环(MIL)。控制逻辑可行性验证。AMESim独立仿真阀控缸位置跟踪性能,分析阶跃响应超调量与调节时间、软件在环(SIL)。代码执行可靠性测试。自动生成C代码植入DYNEXE0模块,验证通信延迟与数据一致性、硬件在环(HIL)。实时性与抗干扰能力验证。连接dSPACE/xPC Target等实时平台,模拟油温突变、负载阶跃等极端工况。

6.3 应用效果与性能提升。桥梁四缸提升系统,偏差耦合同步算法,同步误差从 $\pm 4\%$ 降至 $\pm 2.5\%$ 。挖掘机正流量控制,C++外部程序集成,多路阀响应延迟减少30%。液压调速器,PID Tuner在线整定,压力波动幅值降低60%。

综上所述,基于AMESim的电液比例控制系统动态特性优化,可高效构建高精度电液比例控制系统模型,支撑液压系统设计与故障诊断。通过AMESim-Design Exploration模块批量测试参数敏感性,联合Simulink验证算法鲁棒性;采用FMI接口兼容第三方实时平台实现HIL闭环测试。

参考文献

- [1]李范.液压传动与系统[J].北京:机械工业出版社,2024:5.6.
- [2]吴状.液压元件与系统阻[J].北京:机械工业出版社,2024:7.13.
- [3]路宏.电液比例控制技术[J].北京:机械工业出版社,2024:12.
- [4]吴敏丰.新编实用电液比例技术[J].浙江:浙江大学出版社,2024:7.10.
- [5]许卉.电液比例控制系统分析与设计[J].北京:机械工业出版社,2024:6-9.
- [6]黄顺.电液比例技术发展趋势微探[J].机床研究与应用,2024(4):12.30.