

液机电系统的动态特性分析与参数优化

徐丕兵

青岛市技师学院 山东 青岛 266267

摘要: 液机电系统融合液压、机械与电子技术,其动态特性直接影响系统性能与可靠性。通过数学建模、实验测试、频域分析及状态空间等方法,可精准剖析系统动态行为。在参数优化层面,遗传算法、粒子群优化算法等智能算法与灵敏度分析、多目标优化策略结合,能有效提升系统稳定性、响应速度与能效。相关研究为液机电系统设计与性能提升提供理论依据,对推动工业自动化与智能制造发展具有重要意义。

关键词: 液机电系统; 动态特性分析; 参数优化

引言

随着工业自动化程度的不断提高,液机电系统作为复杂多学科耦合系统,在航空航天、工程机械、汽车制造等领域广泛应用。其动态特性的优劣直接决定设备运行效率与精度,而系统参数的合理优化是保障性能的关键。然而,传统分析与优化方法存在局限性,难以满足高精度、高可靠性需求。本文基于多种先进分析方法与智能优化策略,深入研究液机电系统动态特性并探索参数优化路径,旨在为行业发展提供理论支撑与技术参考。

1 液机电系统概述

液机电系统是融合液压技术、机械技术与电子技术的复杂工程系统,在工业生产、交通运输、航空航天等领域发挥关键作用。其工作原理基于帕斯卡定律,通过液压泵将电动机的机械能转化为液压油的压力能,利用密闭管路中液压油的压力传递,驱动液压缸、液压马达等执行元件完成直线或旋转运动,实现力与运动的传递与控制。机械结构作为系统载体,为液压元件与电子控制单元提供安装支撑,确保各部件间精准的位置关系与运动协调,其设计精度与材料性能直接影响系统的稳定性与可靠性。电子控制单元是液机电系统的神经中枢,借助传感器实时采集压力、流量、位移等关键参数,经信号处理与运算分析后,通过控制器输出控制指令,调节比例阀、伺服阀等液压元件,实现系统的闭环控制与动态响应优化。例如,在工程机械中,液机电系统可根据负载变化自动调整液压泵排量与执行机构出力,既能满足重载工况下的强劲动力需求,又能在轻载时降低能耗。在汽车的液压助力转向系统中,电子控制单元依据车速与转向角度,精确调节液压助力大小,保障低速转向轻便灵活、高速转向沉稳可靠。随着现代工业向高精度、智能化方向发展,液机电系统正朝着

集成化、微型化、节能化方向演进。集成化设计将液压阀组、传感器、控制器等高度集成,减少管路连接与泄漏风险,提升系统紧凑性;微型化技术满足精密仪器、医疗器械等领域对小体积、高性能液机电系统的需求;节能化则通过能量回收、高效液压泵与电机匹配等技术,降低系统运行能耗。先进的液机电系统通过多学科技术深度融合,为各类复杂工况提供稳定、高效、精准的动力与控制解决方案,持续推动装备制造业技术革新与性能升级。

2 液机电系统的动态特性分析方法

2.1 数学建模法

数学建模法在液机电系统动态特性分析中占据核心地位,通过抽象化与公式化手段,将复杂物理系统转化为可求解的数学表达式。针对液压系统,需综合考虑流体力学方程、机械动力学方程以及电路方程,构建包含连续性方程、动量方程、能量方程等的方程组。以液压泵与执行机构为例,分析时需将泵的排量特性、管路的压力损失、执行元件的惯性负载等物理参数,转化为相应的微分方程或代数方程。对于机电耦合部分,还要引入电磁学中的相关定律,描述电机的电磁转矩与机械运动的关系。通过建立数学模型,可从理论层面深入剖析系统的动态行为,如压力波动、流量变化以及速度响应等特性。其优势在于能在设计阶段对系统进行仿真分析,提前预测性能并优化参数,减少实际试验成本与时间。该方法对模型准确性要求极高,若参数选取不当或模型简化过度,可能导致分析结果与实际情况偏差较大,因此在建模过程中需精确考量系统各部件的非线性特性与边界条件^[1]。

2.2 实验测试法

实验测试法是直接获取液机电系统动态特性的重要手段,通过在实际系统或物理模型上设置各类传感

器,实时采集系统运行过程中的关键参数。在液压系统中,常用压力传感器监测管路压力变化,流量传感器测量流体流量,位移传感器获取执行机构的运动状态,同时搭配加速度传感器等监测机械振动情况。对于机电系统,还需运用电流、电压传感器采集电气参数。实验过程中,通过对系统施加不同类型的激励信号,如阶跃信号、正弦信号等,观察系统的响应特性。例如,向液压系统输入阶跃信号,记录压力与流量的瞬态响应曲线,分析系统的响应速度、超调量以及稳态误差等动态指标。实验测试法的优点在于数据直接来源于实际系统,能够真实反映系统的动态性能,可用于验证数学模型的准确性。该方法也存在局限性,实验过程往往受设备条件、环境因素等影响,且对于一些极端工况或危险场景难以模拟,同时实验成本较高,尤其是大型复杂液压机电系统的测试,所需的设备、人力和时间成本巨大。

2.3 频域分析法

频域分析法基于傅里叶变换和拉普拉斯变换,将时域中的动态响应问题转化为频域中的频率特性分析,在液压机电系统动态特性研究中发挥着独特作用。通过对系统传递函数进行频域变换,可得到幅频特性和相频特性曲线,这些曲线直观地展示了系统对不同频率输入信号的响应特性。在液压系统中,利用频域分析法可分析液压管路的共振频率,避免因外界激励频率与管路固有频率接近而引发共振现象,造成系统损坏。对于机电耦合系统,可通过频域分析研究电机控制回路的带宽特性,优化控制系统参数,提高系统的稳定性与响应速度。例如,通过分析系统的伯德图,能够清晰地判断系统的增益裕度和相位裕度,从而评估系统的稳定性。频域分析法具有直观、简便的特点,可有效指导系统的设计与调试。该方法主要适用于线性定常系统,对于非线性系统的分析需要进行线性化处理,可能会引入一定的误差,且频域分析结果不能直接反映系统在时域中的动态行为,需结合时域分析综合判断^[2]。

2.4 状态空间法

状态空间法是一种现代控制理论中的分析方法,将液压机电系统视为一个由多个状态变量描述的动态系统,通过建立状态方程和输出方程,全面刻画系统的动态特性。在液压机电系统中,选取压力、流量、速度、位移等物理量作为状态变量,以输入信号(如控制电压、泵的调节参数等)为自变量,输出信号(如执行机构的位移、系统压力等)为因变量,构建一阶微分方程组形式的状态空间模型。这种方法能够处理多输入多输出系统,可有效分析系统内部各状态变量之间的相互关

系,以及输入输出之间的动态联系。状态空间法的优势在于可应用于线性和非线性系统,并且能够方便地进行系统的稳定性分析、最优控制设计等。例如,通过求解状态方程的特征值,可判断系统的稳定性;利用状态反馈控制策略,可对系统的动态性能进行优化。状态空间法对系统状态变量的选取要求较高,需要准确把握系统的物理本质,且计算过程相对复杂,尤其是对于高阶系统,计算量较大,通常需要借助计算机软件进行求解和分析。

3 液压机电系统的参数优化策略

3.1 基于遗传算法的参数优化

(1) 遗传算法以达尔文生物进化论中的自然选择和遗传学机理为理论基础,通过模拟生物进化过程实现对液压机电系统参数的优化。该算法将系统参数编码为染色体,采用选择、交叉、变异等遗传操作对种群进行迭代进化,在解空间中搜索最优解。在液压机电系统中,将泵的排量、阀的开启压力等关键参数编码成染色体上的基因,通过不断进化,筛选出性能更优的参数组合。

(2) 在实际应用中,首先需根据液压机电系统的特性确定适应度函数,用于评估个体的优劣。适应度函数通常基于系统的效率、能耗、响应时间等性能指标构建。随机生成初始种群,对种群中的个体进行遗传操作,随着进化代数的增加,种群逐渐向最优解方向收敛。以液压伺服系统为例,利用遗传算法优化控制器参数,可有效提高系统的跟踪精度和稳定性。(3) 基于遗传算法的参数优化具有良好的全局搜索能力,能在复杂的解空间中找到较优解。该算法计算复杂度较高,收敛速度相对较慢,且参数设置对优化结果影响较大。在实际应用中,需要根据系统特点合理调整遗传算法的参数,如种群规模、交叉概率、变异概率等,以平衡搜索效率和优化精度。

3.2 基于粒子群优化算法的参数优化

(1) 粒子群优化算法源于对鸟群捕食行为的模拟,将液压机电系统的参数优化问题看作粒子在解空间中的搜索过程。每个粒子代表一组系统参数,粒子在解空间中通过不断调整自身位置,寻找最优解。粒子根据自身历史最优位置和群体历史最优位置来更新速度和位置,从而在解空间中进行高效搜索。在液压泵参数优化中,粒子的位置对应泵的不同参数值,通过迭代更新,使粒子逐渐靠近最优参数组合。(2) 具体实施时,先初始化粒子群的位置和速度,然后根据适应度函数评估每个粒子的适应度。在每次迭代中,粒子更新自身速度和位置,同时记录个体最优位置和全局最优位置。通过不断迭代,粒子群逐渐向最优解聚集。对于液压传动系统的

控制参数优化,粒子群优化算法能够快速找到使系统性能最优的参数,提高系统的动态响应性能。(3)粒子群优化算法计算简单、收敛速度快,在液压机电系统参数优化中表现出良好的性能。该算法容易陷入局部最优解,尤其是在复杂的多峰函数优化问题中。为克服这一缺陷,可采用改进的粒子群优化算法,如引入惯性权重调整策略、动态学习因子等,增强算法的全局搜索能力和跳出局部最优的能力^[3]。

3.3 基于灵敏度分析的参数优化

(1)灵敏度分析是研究液压机电系统参数变化对系统性能影响程度的重要方法。通过计算系统性能指标对各参数的灵敏度,确定哪些参数对系统性能影响较大,从而在参数优化过程中重点关注这些关键参数。在液压回路设计中,分析管道直径、油液粘度等参数对系统压力损失和流量的灵敏度,可明确影响系统性能的关键因素。(2)进行灵敏度分析时,通常采用数值计算或实验的方法,计算系统性能指标在参数微小变化时的变化量。常用的灵敏度分析方法有有限差分法、伴随变量法等。在液压机电系统参数优化中,根据灵敏度分析结果,对灵敏度高的参数进行优化调整,可有效提高系统性能。例如,对于液压控制系统,通过灵敏度分析找到对系统稳定性影响较大的参数,对其进行优化,能够增强系统的稳定性。(3)基于灵敏度分析的参数优化能够明确参数与系统性能之间的关系,为优化提供直观的指导。该方法仅能反映参数对系统性能的局部影响,无法考虑参数之间的相互作用。在实际应用中,常将灵敏度分析与其他优化算法结合使用。先通过灵敏度分析精准确定对系统影响显著的关键参数,再利用其他算法对这些参数进行全局优化,以获得更优的系统性能。

3.4 基于多目标优化的参数优化

(1)液压机电系统往往存在多个相互冲突的性能指标,如效率、精度、能耗等。这些指标间此消彼长,难以同时达到理想状态,给系统优化带来极大挑战。基于多目标优化的方法能够同时考虑多个目标,寻求满足多

个目标要求的最优解集合,即帕累托前沿。在多目标优化过程中,通过构建合适的目标函数和约束条件,将液压机电系统的多个性能指标纳入优化模型,以实现系统的综合性能最优。(2)常用的多目标优化算法包括多目标遗传算法、多目标粒子群优化算法等。这些算法在搜索过程中能够同时考虑多个目标,通过选择、交叉、变异等操作,在解空间中搜索帕累托前沿。在液压伺服系统参数优化中,利用多目标优化算法,可同时优化系统的跟踪精度和能耗,得到一组在不同目标之间权衡的最优参数组合。(3)基于多目标优化的参数优化能够全面考虑系统的多个性能指标,为决策者提供更多选择。多目标优化问题求解难度较大,计算复杂度高,且帕累托前沿的求解精度和均匀性难以保证。在实际应用中,需要根据系统的具体需求和计算资源,选择合适的多目标优化算法,并合理设置算法参数,以获得高质量的帕累托前沿,为液压机电系统的参数优化提供有效支持^[4]。

结语

综上所述,数学建模法、实验测试法等多种动态特性分析方法相互补充,为液压机电系统性能研究提供了全面视角。基于智能算法与灵敏度分析的参数优化策略,显著改善了系统动态性能与稳定性。面对复杂工况下的多目标优化问题,仍需进一步探索高效优化算法与多学科协同优化方法。未来研究将聚焦于动态特性分析与参数优化的智能化、集成化发展,推动液压机电系统性能持续提升,以满足高端装备制造业的应用需求。

参考文献

- [1]谢鑫.液压支架系统泄漏类型及动态特性分析[J].凿岩机械气动工具,2025,51(1):1-3.
- [2]张虎,范红梅,朱刚贤.工程机械液压稳定系统动态特性与实验研究[J].机械设计与制造,2021(5):221-225.
- [3]张磊.基于PID参数优化控制的伞钻液压系统仿真分析[J].机电工程,2020,37(12):1530-1534.
- [4]段航宇.推移装置液压支架系统参数优化分析[J].凿岩机械气动工具,2025,51(3):31-33.