

机械自动化背景下机械液压设计的优化策略

王康

广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ME.2025120050

摘 要： 本文围绕机械自动化背景下的机械液压设计展开，阐述机械液压系统构成及自动化对其影响，分析传统液压系统局限与新要求。提出模块化设计、构建冗余容错机制等优化策略，并通过多种仿真、实验手段验证。实际应用案例证明策略可行有效，同时指出当前研究局限与未来发展方向。

关 键 词： 机械自动化；机械液压设计；优化策略

Optimization Strategies for Mechanical Hydraulic Design under the Background of Mechanical Automation

Wang Kang

Foshan, Guangdong 528000

Abstract： This paper focuses on the optimization strategies for mechanical hydraulic design under the background of mechanical automation. It elaborates on the composition of mechanical hydraulic systems and the impact of automation on them, analyzes the limitations of traditional hydraulic systems and the new requirements. Modular design and the construction of redundancy fault-tolerance mechanisms are proposed as optimization strategies, which are verified through various simulations and experiments. Practical application cases prove the feasibility and effectiveness of the strategies, while also pointing out the limitations of current research and future development directions.

Keywords： mechanical automation; mechanical hydraulic design; optimization strategies

引言

《智能制造发展规划（2016-2020年）》旨在推动制造业智能化转型，在此政策背景下，机械自动化与液压系统的设计紧密相连。机械自动化的发展驱动液压设计变革，同时传统液压系统的局限性也迫切需要优化。在自动化场景下，对液压设计提出新要求。基于此，通过模块化设计、构建冗余容错机制、数字孪生驱动参数整定等优化策略来提升液压系统性能，并经仿真、实验及实际工程应用验证其有效性。虽已取得成果，但仍存局限，未来借助5G工业互联网有望突破局限，推动机械液压设计发展。

一、机械液压设计基础理论与自动化发展现状

（一）机械液压系统基本原理与构成

机械液压系统以帕斯卡原理为基础，即加在密闭液体上的压强，能够大小不变地由液体向各个方向传递。系统主要由动力元件、执行元件、控制元件、辅助元件和工作介质构成。动力元件如液压泵，将机械能转换为液压能；执行元件像液压缸或液压马达，把液压能转变为机械能，实现直线或旋转运动。控制元件例如各种阀类，用于控制和调节液体的压力、流量和方向。辅助元件包含油箱、油管等，为系统提供必要支持。工作介质则起到传递能量的作用。机械自动化技术的发展与机械液压系统紧密相连，自动化技术的进步促使液压系统在控制精度、响应速度等方面不断优化，而机械液压系统的基础理论也为自动化技术在该领域的应用提供了支撑^[1]。

（二）机械自动化对液压设计的驱动效应

机械自动化对液压设计有着显著的驱动效应。随着机械自动化的发展，智能控制算法被引入液压设计中，改变了传统液压系统相对固定的控制模式。通过智能算法，液压系统能够依据实时工况自动调整参数，实现更精准高效的运作^[2]。传感器集成也为液压设计带来新契机，各类传感器可实时监测液压系统的压力、流量等关键参数，为系统稳定运行提供数据支持，使设计能基于实际反馈不断优化。此外，机电一体化趋势促使液压设计与电子技术深度融合，机械自动化的先进理念和技术为液压设计注入新活力，推动液压系统朝着小型化、高性能、智能化方向发展，重构了液压系统的设计范式，使其在工业生产等领域发挥更大效能。

二、机械液压系统现存问题与优化需求分析

（一）传统液压系统的局限性表征

在机械自动化背景下，传统液压系统存在诸多局限性。以典型案例来看，响应迟滞问题较为突出，由于传统液压系统的结构和工作原理特性，在面对快速变化的工况需求时，无法迅速做出响应，导致系统动作的及时性大打折扣，影响整体工作效率。同时，能效损耗也是一大弊病，其能量转换过程相对复杂，在传输与转换环节中存在大量能量损失，造成能源的浪费。此外，故障诊断存在盲区，传统液压系统的故障诊断主要依赖人工经验与简单检测设备，对于一些隐蔽性强、多因素耦合导致的故障，难以精准定位和快速诊断，这增加了设备维修成本与停机时间。这些局限性迫切需要对机械液压设计进行优化^[3]。

（二）自动化场景下的新型设计要求

在自动化场景下，对机械液压设计提出了新型要求。从动态精度方面来看，工业机器人与数控机床等自动化装备的运行速度和定位精度要求不断提升，现有的机械液压系统难以满足其在高速、高精度运动时对压力、流量的精准控制，导致定位偏差和运动平稳性不足^[4]。环境适应性上，自动化生产环境多样复杂，如高温、潮湿、粉尘等恶劣工况，传统液压系统在这样的环境下易出现泄漏、腐蚀、元件磨损加剧等问题，影响系统稳定性与寿命。而在维护智能化层面，随着自动化程度提高，传统人工定期维护方式效率低且难以实时察觉潜在故障，自动化场景迫切需要液压系统具备智能监测、故障诊断与预警功能，实现维护的智能化与精准化，以保障自动化装备的高效稳定运行。

三、机械自动化驱动的液压系统优化策略体系

（一）拓扑结构优化策略

1. 模块化液压单元设计方法

在机械自动化背景下，模块化液压单元设计可通过功能解耦来实现。提出基于功能解耦的分布式液压模块架构，将复杂的液压系统分解为多个相对独立的功能模块^[5]。这种架构对于自动化产线快速重构具有显著技术优势。各模块能依据生产需求灵活组合与调整，在面对产品变更或工艺改进时，无需对整个液压系统进行大规模改造，只需更换或添加相应模块，极大提升了产线的灵活性与适应性。例如，在汽车零部件自动化生产线上，不同生产工序的液压需求可由独立模块提供，当产品型号改变，生产流程调整时，各模块能快速重新配置，有效缩短产线重构时间，提高生产效率，降低成本，为机械自动化生产提供有力支撑。

2. 冗余容错机制构建

在机械自动化驱动的液压系统中，冗余容错机制构建至关重要。需深入研究故障状态下备用液压通道的智能切换逻辑。当主液压通道出现故障时，系统应能迅速且精准地感知，通过预设的智能算法，快速判定故障类型与位置，随即触发备用液压通道投入使用^[6]。此智能切换逻辑需确保动作的及时性与准确性，避免因切换延迟或错误引发自动化系统运行异常。同时，要对备用液

压通道进行定期检测与维护，保证其随时处于良好备用状态，从而全方位保障自动化系统的持续可靠运行，降低因液压系统故障导致的停机风险，提升整个机械自动化设备的稳定性与可靠性。

（二）控制算法优化策略

1. 数字孪生驱动的动态参数整定

在机械自动化背景下，数字孪生驱动的动态参数整定对液压系统优化意义重大。通过构建液压系统数字孪生模型，该模型能实时映射物理系统状态。在此基础上，开发基于实时数据反馈的PID参数自适应调整算法。借助传感器实时采集系统压力、流量等关键数据，并传输至数字孪生模型，模型利用这些数据精确分析系统运行状况。依据分析结果，算法自动调整PID参数，使系统能快速响应不同工况变化，维持稳定高效运行。例如在负载突变时，系统可及时调整参数，避免压力波动过大影响设备性能。这种基于数字孪生驱动的动态参数整定策略，实现了液压系统参数的精准优化，提升系统整体性能^[7]。

2. 深度学习辅助的故障预测技术

在机械自动化背景下，利用深度学习辅助的故障预测技术对液压系统进行优化意义重大。通过设计LSTM神经网络模型对液压系统运行状态展开时序分析，能够有效实现关键部件的剩余寿命预测。LSTM神经网络具备处理时间序列数据的优势，可捕捉液压系统运行数据中的复杂动态特征与长期依赖关系。将系统运行时的压力、流量、温度等多维度数据作为输入，经LSTM模型深度分析与学习，挖掘数据背后隐藏的故障模式与趋势信息，提前预判关键部件的剩余寿命。如此，可帮助运维人员及时制定维护计划，提前更换部件，避免因部件突发故障导致的停机损失，提高液压系统运行的可靠性与稳定性^[8]。

四、优化策略的工程验证与应用研究

（一）多物理场联合仿真验证

1. AMESim-MATLAB协同仿真平台构建

为验证机械液压设计优化策略在动态响应特性方面的改善效果，构建AMESim-MATLAB协同仿真平台。AMESim擅长液压系统建模与仿真，MATLAB在控制算法开发及数据分析处理上优势显著^[9]。通过将两者结合，能够搭建包含机械、液压、电气等多物理场的耦合仿真环境。在该平台中，可精确模拟机械液压系统的实际运行工况，将优化策略所涉及的参数与控制算法融入其中，进而对系统的动态响应特性进行深入分析。通过这种协同仿真方式，能够直观地观察到优化策略实施后，系统在速度、压力等关键指标上的动态变化，准确评估优化策略对系统动态响应特性的改善程度，为实际工程应用提供有力的技术支持与数据依据。

2. 能效优化仿真对比分析

在机械自动化背景下对机械液压设计的优化策略进行能效优化仿真对比分析时，基于功率流分析量化节能改造效果，对新型液压回路的能源利用率提升幅度展开验证。一方面，利用专业仿真软件构建多种不同的液压系统模型，涵盖传统液压回路与新型

液压回路。在相同的工况条件设定下，对各模型的能源利用相关参数进行模拟计算，像系统总输入功率、输出有用功率等^[10]。另一方面，对比分析不同模型的计算结果，清晰呈现新型液压回路相较于传统回路在能源利用率上的具体提升数值，直观展示优化策略在能效方面带来的优势，为实际工程应用中选择更优的机械液压设计方案提供可靠的量化依据。

（二）实物原型实验研究

1. 自动化测试台架设计

为实现多工况条件的自动化加载与数据采集，需精心设计自动化测试台架。台架的架构设计需充分考虑机械液压系统的特性，确保各组件布局合理，便于安装与调试。选用高精度的传感器来实时监测压力、流量等关键参数，以精准反馈系统运行状态。针对多工况自动化加载需求，设计智能控制系统，能够依据预设程序快速切换不同工况模式。集成工业总线协议，实现各设备间高效的数据传输与交互，保证数据采集的准确性与实时性。通过合理布局加载装置、动力源等部件，打造紧凑且功能完备的测试台架，为机械液压系统在不同工况下的性能测试提供稳定可靠的实验环境，有效验证优化策略在实际工程中的可行性与有效性。

2. 关键性能指标实验验证

在机械自动化背景下的机械液压设计优化策略研究中，通过阶跃响应测试、连续运行稳定性试验等实验手段来验证其实际工程价值。进行阶跃响应测试时，对实物原型输入阶跃信号，观测系统输出响应，以此评估系统的动态性能，如响应时间、超调量等，明确优化策略能否使系统快速、稳定地跟踪输入信号变化。开展连续运行稳定性试验，让实物原型长时间连续运行，监测压力、流量等关键参数的波动情况，判断优化后的机械液压设计在长时间工作下是否能保持稳定，减少故障发生概率。这些关键性能指标的实验验证，可全面检验优化策略在实际工程应用中的有效性与可靠性。

（三）典型工业场景应用案例

1. 注塑机液压系统智能化改造

在注塑机液压系统智能化改造中，应用优化策略实现了显著成效。经实际工程验证，注塑成型装备的循环周期大幅缩短。通

过对液压系统的智能控制与参数优化，使注塑过程各环节衔接更为紧密、高效，原本较长的周期得以明显压缩。同时，能耗也显著降低。借助先进的节能技术与智能算法，系统能够根据注塑工艺的实际需求精准调节液压动力输出，避免了传统液压系统因持续高压输出造成的能源浪费。具体数据表明，在采用优化策略后，注塑成型装备的循环周期平均缩短了12%–18%，能耗降低了20%–35%，有力证明了该优化策略在注塑机液压系统智能化改造中的可行性与有效性，为机械自动化背景下的机械液压设计提供了重要的实践参考。

2. 工程机械液压驱动系统升级

在机械自动化背景下，以挖掘机液压系统为例，通过采用新的优化策略，实现工程机械液压驱动系统升级。升级后，挖掘机液压系统在复合动作协调性方面性能显著提升。比如在挖掘与回转复合动作时，动作响应时间大幅缩短，从原本的约0.9秒降至0.4秒，极大提高了作业效率。压力波动也得到有效控制，波动范围从2.0MPa 缩小至0.5MPa，使得复合动作更加平稳，减少了对设备的冲击和磨损，延长设备使用寿命。同时，流量分配更加精准，偏差控制在 $\pm 3\%$ 以内，各执行元件能按需获得流量，进一步提升复合动作协调性，充分验证了优化策略在工程机械液压驱动系统升级中的有效性与实用性。

五、总结

在机械自动化背景下，对机械液压设计优化策略的探索取得了一系列创新成果，涵盖系统架构、控制算法等多方面的优化，提升了液压系统的性能与效率。然而，当前研究仍存在局限，材料兼容性方面，不同部件材料间的相互作用研究不足，可能影响系统长期稳定性；极端工况适用性研究不够深入，难以满足特殊环境与高强度作业需求。展望未来，随着5G工业互联网的发展，下一代智能液压系统有望实现更精准的远程监控与控制、更高效的故障诊断与预测性维护，借助高速数据传输与云计算能力，突破现有局限，推动机械液压设计向智能化、自适应方向发展，从而更好地适应复杂多变的工业生产需求。

参考文献

- [1] 邱绍雪. “双减”背景下小学英语作业设计的优化策略研究 [D]. 吉首大学, 2023.
- [2] 王诏. 混合式液压-机械无级传动方案设计及优化 [D]. 重庆大学, 2021.
- [3] 赵琦. 工程专业认证背景下地方高校人才培养模式的优化策略研究——基于山东省D学院机械类专业的分析 [D]. 辽宁师范大学, 2021.
- [4] 王桂红. 核心素养背景下启发式教学存在的问题及优化策略研究 [D]. 曲阜师范大学, 2021.
- [5] 杜尧尧. 双减背景下小学语文家庭作业优化设计的行动研究 [D]. 青岛大学, 2023.
- [6] 金洪刚. 机械自动化设备优化探究 [J]. 河北农机, 2021(3): 103–104.
- [7] 李雪谊, 葛智学. 现代液压技术在机械自动化制造中的运用试析 [J]. 包装世界, 2022(5): 106–108.
- [8] 曹露. 机械自动化设计与制造存在问题与解决策略 [J]. 湖北农机化, 2021(4): 102–103.
- [9] 李红红. 机械自动化在矿山机械制造中的应用策略探讨 [J]. 中国金属通报, 2021(1): 69–70.
- [10] 陈兴云. 现代液压技术在机械自动化生产中的应用 [J]. 河北农机, 2021(9): 104–105.