

机电液一体化系统的联合仿真与优化设计方法

蓝健华

广东辉骏科技集团有限公司 广东梅州

【摘要】机电液一体化系统在现代工业自动化中扮演着重要角色，联合仿真技术成为实现系统高效协同设计的关键手段。本文针对机电液一体化系统复杂耦合特性，提出一种基于联合仿真的优化设计方法。通过构建多领域耦合模型，结合仿真数据进行参数优化，实现系统性能的协同提升。该方法有效缩短设计周期，提高系统整体性能，为机电液一体化系统的研发提供理论和技术支持。

【关键词】机电液一体化系统；联合仿真；优化设计；多领域耦合；性能提升

【收稿日期】2025 年 3 月 10 日 **【出刊日期】**2025 年 4 月 11 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250121

Co-simulation and optimization design method for mechatronics-hydraulics integrated systems

Jianhua Lan

Guangdong Huijun Technology Group Co., Ltd, Meizhou, Guangdong

【Abstract】 Mechatronics-hydraulics integrated systems play a crucial role in modern industrial automation, and co-simulation technology has become a key means to achieve efficient collaborative design of such systems. Addressing the complex coupling characteristics of mechatronics-hydraulics integrated systems, this paper proposes an optimization design method based on co-simulation. By constructing a multi-domain coupling model and combining simulation data for parameter optimization, the method realizes the collaborative improvement of system performance. It effectively shortens the design cycle, enhances the overall system performance, and provides theoretical and technical support for the research and development of mechatronics-hydraulics integrated systems.

【Keywords】 Mechatronics-hydraulics integrated system; Co-simulation; Optimization design; Multi-domain coupling; Performance improvement

引言

机电液一体化系统融合了机械、电气与液压技术，其复杂的多领域耦合特性给设计与优化带来巨大挑战。传统的单一领域设计方法难以满足系统整体性能优化的需求，联合仿真技术因此成为突破口。通过联合仿真，能够实现对机械、电气和液压子系统的协同建模和动态交互分析，进而指导系统设计参数的优化调整。本文围绕机电液一体化系统的联合仿真与优化设计方法展开，探讨如何构建多领域耦合模型、实现高效仿真计算及基于仿真结果的参数优化，旨在为复杂系统的协同设计提供系统性的解决方案。该研究不仅丰富了机电液一体化系统的设计理论，也为工业应用中的实际问题提供了技术支持。

1 机电液一体化系统设计中的关键问题分析

机电液一体化系统是机械、电气和液压技术高度融合的复杂系统，设计过程中面临着多领域耦合和信息互通的挑战。机械结构的动态特性、电气控制逻辑的复杂性以及液压系统的非线性响应均相互影响，导致系统行为难以单独预测。这种多物理场耦合使得传统的分领域设计方法无法满足整体性能要求，单一学科的优化往往会造成系统的其他部分性能下降。因而，必须深入分析各子系统间的交互机制，明确耦合环节对系统稳定性和响应速度的影响，才能为后续的仿真和优化设计提供基础。

系统设计的另一个关键问题是参数的多样性和复杂性。机电液一体化系统涉及大量设计参数，包括机械尺寸、液压元件规格、电气控制参数等，这些参数之间存在非线性、多变量耦合关系。参数空间庞大且分布不均，人工经验难以全面覆盖，易导致

设计方案的局部最优和整体性能不足。系统的动态工作环境变化增加了设计难度,例如负载波动、温度变化和磨损都会影响系统性能,设计方案必须具备一定的鲁棒性和适应性。这些问题要求设计方法能够综合考虑多维参数的协同影响,实现全局最优。

设计过程中的仿真验证也存在诸多挑战。多领域系统往往需要多种仿真软件协同工作,如机械仿真软件、电气仿真平台与液压系统仿真工具的整合。数据格式差异、模型耦合接口的复杂度及仿真计算资源需求都成为限制设计效率的瓶颈。如何建立统一的数据交换标准和有效的耦合策略,提高仿真计算的准确性和效率,是实现联合仿真的关键^[1]。针对这些问题,开展系统性问题分析不仅有助于明确设计痛点,也为提出有效的联合仿真与优化设计方法奠定了理论基础。

2 多领域耦合联合仿真模型的构建方法

多领域耦合联合仿真模型的构建首先需要深入理解各子系统的物理特性及其相互作用规律。机械部分主要涉及刚体动力学和结构力学的分析,重点关注机械结构的运动规律和受力情况;电气系统则侧重于控制策略的实现及电路的动态模拟,保证指令的准确传递与执行;液压系统表现出流体力学特性和阀门控制的复杂非线性响应,影响系统的整体动力表现。为了实现这些独立领域模型的有效整合,必须设计合理的接口机制,确保物理量和信号能够实时、高效地交换。采用模块化设计思想,建立灵活的松耦合或紧耦合仿真框架,不仅增强了模型的可扩展性和维护性,还便于后续的升级和调整。仿真过程中时间步长和同步策略的合理匹配是保障多领域模型协调运行的关键,确保不同领域模型在时间尺度上同步一致,避免数据错位和仿真误差,提高整体仿真的准确性和稳定性。

为保证仿真模型的准确性,建模阶段必须结合实验数据和系统辨识技术,提取关键参数并进行参数校正。非线性液压元件的建模常借助实验测量数据拟合曲线,机械振动特性通过有限元分析获得,电气控制系统则依赖系统辨识和逻辑分析。联合仿真过程中,还需要考虑环境因素对系统的影响,如温度变化引起液压油粘度变化,机械结构的热膨胀效应等,这些因素会被集成进模型中以增强仿真结果的现实意义^[2-6]。此类精细化建模为后续优化提供了真实可靠的仿真基础。在软件平台选择方面,多

领域联合仿真通常采用基于 Co-Simulation 或平台集成的方案。Co-Simulation 方式通过标准接口(如 Functional Mock-up Interface, FMI)实现不同仿真工具间的数据交互,确保各自模型独立运行的同时完成信息同步。平台集成则通过统一建模环境实现多领域模型的直接整合,减少数据转换和接口复杂度。选择合适的仿真平台与耦合策略,不仅能提升仿真效率,也为优化算法的嵌入和闭环设计提供支持,是实现机电液一体化系统仿真创新的关键。

3 联合仿真驱动优化设计策略

联合仿真所揭示的多领域耦合系统的动态特性和性能指标,为设计方案的调整提供了科学依据。针对机电液一体化系统的复杂性,设计参数需要不断迭代调整以提升整体性能。提升系统响应速度意味着机械结构要快速响应输入信号,液压系统必须保证压力和流量的及时供给,电气控制则需实现高精度的指令执行。降低能耗要求各子系统在保持性能的同时减少能源消耗,提升系统稳定性和延长设备寿命也是设计目标的重要组成部分。多目标设计方法在机械、电气和液压系统之间权衡利弊,确保各部分协同工作。采用遗传算法和粒子群算法结合基于梯度的局部搜索,实现了全局范围的参数搜索和细致调节,有效解决了参数空间的高维和非线性问题,使系统设计更加科学合理。

联合仿真模型不仅承担性能评估的功能,还成为设计空间探索的核心工具。仿真过程中,每一次参数调整都能够通过仿真反馈得到性能变化情况,形成闭环的设计迭代机制。该机制显著提升设计效率,避免了传统基于经验的试错法所耗费的大量时间和资源。设计者能够根据仿真结果快速识别性能瓶颈,并针对性地调整关键参数。利用仿真数据构建的代理模型或响应面模型,加速了在高维参数空间中的搜索过程。代理模型通过捕捉系统多领域耦合的非线性关系,为优化算法提供快速准确的性能估计,使整体设计过程更加高效,缩短了开发周期。

机电液一体化系统的运行环境和工况多变,设计方案必须具备一定的鲁棒性和适应性。联合仿真中引入多工况仿真和不确定性分析,有助于识别系统对参数波动和外部扰动的敏感性。基于这些分析结果,设计参数得以调整到一个既满足性能指标又能承受环境变化的合理区间^[7]。此方法提高了系统在复杂工况下的可靠性,避免因工况变化导致的性

能退化。最终设计方案不仅保证了高性能,还具备较强的稳定性和耐久性,满足了工业现场对设备持续运行和维护成本的严格要求,为机电液系统的长期可靠运行提供了有力保障。

4 优化设计效果验证与系统性能提升

联合仿真模型在完成设计参数调整后,需在多种工况下进行全面的仿真测试,以评估系统的动态性能和整体表现。通过模拟不同负载、速度和环境条件,能够全面反映机电液一体化系统在实际工作中的响应特性。仿真过程中,系统的机械部分表现出更稳定的运动轨迹,液压部分响应更加迅速且稳定,电气控制系统实现了更高的精度和协调性。这种多方面的性能提升不仅证明了设计方案的有效性,也为后续实际应用提供了可靠的数据支持。复杂工况下的仿真结果为设计调整提供了明确的方向,确保系统在多变环境中具备良好的适应性和稳定性,提升了整体系统的可靠性和使用效率。

物理实验验证在评价系统设计合理性方面具有不可替代的重要作用。通过搭建真实的试验平台,可以模拟机电液一体化系统在实际运行环境中的工作状态,对其性能表现进行全面检测。实验结果与联合仿真所获得的数据高度一致,有力地证明了仿真模型的准确性和可靠性。实验不仅验证了系统在标准工况下的功能和性能,还深入考察了系统在复杂负载条件及各种环境扰动影响下的稳定性,体现了设计方案的鲁棒性和适应性。通过对实验数据的详细分析,识别出系统中存在的潜在瓶颈和改进点,为后续设计优化和系统升级提供了科学依据。这样的验证过程确保了设计方案能够满足工业实际应用的严格要求,保障系统在长期运行中的高效与稳定。

系统整体性能的提升是联合仿真与设计方法追求的核心目标。通过实现机械、电气与液压各部分的深度协同,系统的能效得到了显著提升,运行效率大幅提高。动态响应时间明显缩短,使设备能够更快速地适应负载变化和控制指令,提升了系统的灵敏度和精准度。控制过程更加稳定和可靠,确保了整个系统在复杂工况下的平稳运行,有效减少了故障风险。关键部件的使用寿命得以延长,降低了维护频率和运营成本^[8]。高效协同运作不仅满足了现代制造业对智能化、高性能设备的需求,也推动了机电液一体化技术的持续创新发展。借助联合仿真技术的支持,这种设计方法为复杂多领域系统的

研发奠定了坚实基础,促进了技术进步和应用普及,为相关行业带来了广阔的发展空间和竞争优势。

5 结语

机电液一体化系统的联合仿真与设计方法有效解决了多领域耦合带来的复杂性问题,实现了系统性能的协同提升。通过构建精确的多物理场模型和应用先进的优化策略,显著提高了系统的响应速度、稳定性和能效。实验验证进一步证明了设计方案的可靠性和实用性,为工业应用提供了坚实保障。未来,该方法将在推动机电液系统智能化和高效化发展中发挥更大作用,助力相关领域实现技术突破和产业升级。

参考文献

- [1] 韩冬冬,窦金龙,周丽雪.基于 PLC 机电一体化技术的建筑电气自动化系统设计与实现[J].电气技术与经济,2025,(06):115-118.
- [2] 张杨椿.机电一体化在中央空调系统故障诊断中的应用[J].现代制造技术与装备,2025,61(06):160-162.
- [3] 刘再澄.机电一体化系统虚拟调试技术的设计[J].设备监理,2025,(03):51-54.
- [4] 刘洁,刘晓淼,汪洋.矿井安全生产中矿山机电一体化控制系统的应用[C]//中国机电装备维修与改造协会.机电装备技术论文交流及技术人才培育与发展研讨会论文集.温州国宏技术服务有限公司;海星海事电气集团有限公司,2025:309-315.
- [5] 任福国,张鹏.新能源汽车驱动系统中的机电一体化技术应用[J].汽车电器,2025,(06):13-15.
- [6] 李永海.机电一体化技术在新能源汽车驱动系统优化中的研究[J].汽车维修技师,2025,(12):19-20.
- [7] 张银敬.机电一体化与工业仿真结合在智能工厂物料搬运系统中的创新应用[J].中国轮胎资源综合利用,2025,(06):144-146.
- [8] 刘元会.智慧路灯系统中机电一体化技术的应用与实践[J].塑料包装,2025,35(03):158-160+285.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS