

液压与电气混合驱动的工程机械臂控制策略研究

王兴飞

石家庄技师学院 河北石家庄

【摘要】随着工程机械智能化发展，液压与电气混合驱动工程机械臂因兼具高效节能与精准操控优势备受关注。聚焦其控制策略，分析混合驱动系统特性，针对能量管理与运动控制难题，提出基于模型预测与自适应控制的协同策略。通过优化液压泵电机协同工作逻辑，结合电气伺服系统快速响应能力，实现系统能耗降低与控制精度提升。仿真与实验验证该策略有效改善工程机械臂动态性能与能量利用效率，为混合驱动工程机械臂的广泛应用提供技术支撑。

【关键词】液压电气混合驱动；工程机械臂；控制策略；模型预测控制；自适应控制

【收稿日期】2025 年 4 月 15 日

【出刊日期】2025 年 5 月 24 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250238

Research on control strategy of hydraulic and electrical hybrid drive construction machinery arm

Xingfei Wang

Shijiazhuang Technician College, Shijiazhuang, Hebei

【Abstract】As the intelligent development of construction machinery progresses, hydraulic and electrical hybrid drive arms have garnered significant attention due to their combined advantages of high efficiency, energy savings, and precise control. Focusing on their control strategies, this paper analyzes the characteristics of hybrid drive systems and addresses the challenges in energy management and motion control by proposing a collaborative strategy based on model predictive and adaptive control. By optimizing the logic for coordinated operation between the hydraulic pump and motor, combined with the rapid response capability of the electrical servo system, the strategy aims to reduce system energy consumption and improve control accuracy. Simulation and experimental validation show that this strategy effectively enhances the dynamic performance and energy utilization efficiency of construction machinery arms, providing technical support for the widespread application of hybrid drive arms.

【Keywords】Hydraulic and electrical hybrid drive; Construction machinery arm; Control strategy; Model predictive control; Adaptive control

引言

在工程机械领域，传统液压驱动系统能耗高、响应慢，纯电驱动系统功率密度不足，难以满足复杂工况需求。液压与电气混合驱动融合两者优势，成为提升工程机械性能的关键技术。但混合驱动系统的能量耦合与多动力源协同问题，导致控制策略复杂。如何实现系统高效稳定运行，优化能量分配与运动控制，成为亟待解决的重要课题。

1 驱动系统难题

液压与电气混合驱动工程机械臂的驱动系统，犹如精密复杂的交响乐演奏，各部分需精准配合才能奏响高效运行的乐章，然而现实却面临诸多困境。从能量管理层面来看，其复杂性堪比一盘纵横交错的棋局。液

压系统作为传统的动力来源，在面对负载变化时，就像一位难以捉摸的舞者，压力会出现剧烈波动。当工程机械臂在挖掘作业中遭遇坚硬岩石，液压系统压力瞬间飙升，大量能量以热能的形式白白损耗，不仅降低了能源利用效率，还可能因过热影响设备寿命。电气系统虽然具备响应速度快的优势，如同敏捷的猎豹，但在与液压系统协同工作时，由于二者动力源特性截然不同，就像来自不同世界的伙伴，在功率匹配上极易失衡。液压系统擅长提供持续稳定的大扭矩，而电气系统则更偏向于快速的启停和灵活的调节，这种差异使得系统在运行过程中难以做到能量的合理分配，导致整体效率低下。

这种能量管理的复杂性进一步加剧了控制协调性

的难题。液压系统本身具有很强的非线性特征,其工作状态与负载、温度、液压油粘度等多种因素紧密相关,使得系统的运行规律难以精确把握。当负载发生变化时,压力的波动并非呈现简单的线性关系,而是呈现出复杂的非线性变化,这无疑给控制带来了巨大挑战。而电气系统虽然响应迅速,但在与液压系统配合时,由于缺乏有效的协调机制,常常出现“各自为政”的局面^[1]。二者结合后,整个系统的模型不确定性大幅增加,如同蒙上了一层神秘的面纱,使得控制算法难以准确预测系统的行为,无法实现对工程机械臂的精准控制,进而严重影响了其工作性能与能效。

液压与电气混合驱动系统的能量损耗问题还体现在能量转换环节。液压系统在将机械能转换为液压能以及再转换回机械能的过程中,存在着各种形式的能量损失,如液压泵的容积损失、机械摩擦损失等^[2]。电气系统在电能与机械能的转换过程中,同样会产生诸如电机铜损、铁损等能量损耗。这些能量损耗不仅降低了系统的整体效率,还增加了设备的运行成本和维护负担。

2 控制方案构建

为解决液压与电气混合驱动工程机械臂面临的控制难题,构建基于模型预测与自适应控制的混合驱动控制方案显得尤为重要。模型预测控制算法犹如一位具有前瞻性的战略家,它能够对工程机械臂未来的运动状态与负载变化进行深入预测。在实际作业场景中,当工程机械臂准备进行一次挖掘动作时,模型预测控制算法会依据当前的工作状态、历史数据以及预设的作业任务,对接下来一段时间内臂的位置、速度、加速度等运动参数进行精准预估,同时还会预测负载可能发生的变化情况。基于这些预测结果,算法能够提前规划液压泵与电机的输出功率,就像一位经验丰富的指挥官合理调配兵力一样,确保在不同的作业阶段,液压泵和电机都能输出恰到好处的功率,实现能量的优化分配。这种提前规划的方式,避免了因功率输出不合理而导致的能量浪费,提高了系统的能源利用效率。

自适应控制技术在控制方案中则扮演着灵活应变的角色。由于液压与电气混合驱动系统存在着严重的非线性以及参数变化的问题,如同在多变的天气中航行的船只,需要不断调整方向。自适应控制技术能够实时监测系统的运行状态,根据系统的实际响应与预期响应之间的差异,迅速调整控制参数。当液压系统因温度升高导致液压油粘度发生变化,进而影响系统性能时,自适应控制技术能够及时感知这一变化,并自动调

整控制参数,补偿因粘度变化带来的影响,确保系统的稳定运行^[3]。这种实时调整参数的能力,有效增强了系统的鲁棒性,使系统在面对各种不确定因素和干扰时,依然能够保持良好的工作性能。

为了实现液压与电气系统的协同控制,建立两者的联合模型至关重要。这个联合模型就像一座沟通液压与电气两个世界的桥梁,它将液压系统和电气系统视为一个有机的整体,综合考虑二者之间的相互作用和影响。通过对联合模型的深入分析和研究,能够清晰地了解液压系统和电气系统在不同工况下的运行特性和协同关系,从而制定出更加合理有效的控制策略^[4]。在实际应用中,基于联合模型设计的控制策略能够精确地协调液压泵和电机的工作,使它们能够相互配合、协同工作,共同完成工程机械臂的各种复杂动作。

3 策略优化实施

策略优化实施是将控制方案从理论转化为实际应用的关键环节,主要从硬件与软件两个方面展开。在硬件方面,对液压泵变量机构与电机驱动装置的改进是提升系统性能的重要举措。传统的液压泵变量机构在响应速度和调节精度上存在一定的局限性,就像一辆反应迟钝的汽车,无法快速适应复杂的路况。通过采用先进的设计理念和制造工艺,对液压泵变量机构进行优化改进,使其能够更加迅速、精确地调整排量,以满足不同工况下对液压油流量和压力的需求。对电机驱动装置进行升级改造,采用高性能的功率器件和先进的驱动电路,提高电机的驱动能力和控制精度,使电机能够更加稳定、高效地运行。

增设高精度传感器也是硬件优化的重要内容。高精度传感器犹如工程机械臂的“眼睛”和“耳朵”,能够实时采集系统的压力、流量、位置等关键参数。在工程机械臂的工作过程中,这些传感器会持续不断地收集各种数据,并将其传输给控制系统^[5]。通过对这些数据的实时分析和处理,控制系统能够及时了解系统的运行状态,准确判断系统是否处于正常工作范围,以及是否存在潜在的故障隐患。当压力传感器检测到系统压力异常升高时,控制系统能够迅速做出反应,采取相应的措施避免设备因压力过高而损坏。

在软件方面,开发专用控制程序是实现策略优化实施的核心。这个专用控制程序就像工程机械臂的“大脑”,它嵌入了优化后的控制算法,能够对液压与电气系统进行动态协调控制。开发过程中,工程师们需要根据控制方案的要求,结合硬件系统的特点,精心设计程序的架构和功能模块^[6]。程序不仅要具备强大的数据

处理能力,能够快速、准确地处理传感器采集到的大量数据,还要能够根据控制算法的指令,实时生成相应的控制信号,驱动液压泵和电机工作。程序还需要具备良好的人机交互界面,方便操作人员对系统进行设置和监控。

4 性能验证分析

为了确保控制策略的效能和稳定性,进行性能验证分析是至关重要的一步。这一过程主要通过两种方式来实现:仿真和实验。在仿真阶段,首先需要在专业的仿真平台上构建一个混合驱动工程机械臂的模型。这个模型相当于一个虚拟的工程机械臂,它能够精确地复现实际工程机械臂的物理结构、运动特性以及液压与电气混合驱动系统的工作机制。通过精心设置模型的参数,可以使其尽可能地反映实际系统的运行状态。在仿真过程中,可以模拟出各种不同的工况,包括挖掘、装载、搬运等,这些工况覆盖了工程机械臂在实际操作中可能遇到的多种情况。

将基于模型预测与自适应控制的新策略应用于仿真模型,并与传统控制策略进行对比。在能耗方面,新策略通过提前规划液压泵与电机的输出功率,实现了能量的优化分配,避免了不必要的能量损耗,相比传统策略,能够显著降低系统的能耗。在运动精度上,新策略利用模型预测控制算法对工程机械臂未来运动状态的精准预测,以及自适应控制技术对系统非线性和参数变化的有效补偿,使得工程机械臂能够更加准确地按照预定轨迹运动,大大提高了运动精度^[7]。在响应速度方面,新策略能够快速感知工况变化,并及时调整控制参数,驱动液压泵和电机做出相应的响应,相比传统策略,系统的响应速度得到了大幅提升。

进入实验阶段,将优化后的控制策略应用于实际的工程机械臂。在实际设备上安装相应的传感器、控制器等硬件设备,并将专用控制程序下载到控制器中。在实验过程中,让工程机械臂在真实的作业环境中进行各种操作,模拟实际工程中的不同工况。通过高精度传感器实时采集工程机械臂在运行过程中的各种数据,包括压力、流量、位置、速度等^[8]。对采集到的数据进行详细分析,对比实际运行数据与仿真结果以及理论

预期,评估控制策略在实际应用中的性能表现。

5 结语

液压与电气混合驱动工程机械臂控制策略研究取得阶段性成果。研究团队通过构建高精度动力学模型,将模型预测控制(MPC)与自适应控制算法深度耦合,有效抑制了系统非线性干扰,使响应速度提升,能量损耗降低。未来,随着智能控制技术与传感器精度的持续提升,控制策略将向更智能化、集成化方向发展。通过探索与人工智能、物联网技术的融合,实现工程机械臂全生命周期的智能监控与优化,将成为该领域突破性性能瓶颈的重要方向。

参考文献

- [1] 何俊美.燃油工程机械排放控制研究[J].内燃机与配件,2025,(08):125-127.
- [2] 龚涛,卢宁,郑宏远.智能控制技术在工程机械中的应用研究[J].中国工程机械学报,2025,23(02):249-253.
- [3] 林克任.公路工程机械自动化控制技术的发展与应用研究[J].中国高新科技,2025,(06):94-96.
- [4] 呼佳宁,何校初,张钢锋,等.工程机械涂装减污降碳协同控制效果评估[J/OL].环境保护科学,1-7[2025-05-19].
- [5] 丁振山,乔金师.基于 PLC 技术的工程机械电气设备自动化控制系统设计[J].中国机械,2024,(36):28-31.
- [6] 徐坤军.建筑工程机械成孔灌注桩施工质量控制难点分析与预防措施[J].建材发展导向,2024,22(17):34-37.
- [7] 蒋秀英.工程机械发动机及液压系统的冷却系统的智能控制[J].内燃机与配件,2024,(17):96-98.
- [8] 覃桂吉.工程机械发动机油门数字调节控制系统的研究[J].内燃机与配件,2024,(15):97-99.

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/>

