

机电系统动力学建模与优化控制的研究

缪建成

320683*****411X

摘要: 机电系统是现代工业与智能装备的核心构成部分,其动力学特性与控制性能直接影响装备的运行精度、稳定性及能效。随着工业4.0与智能制造的深入推进,机电系统向高速、高精度、集成化方向发展,传统建模与控制方法已难以适配复杂工况需求。本文围绕机电系统动力学建模与优化控制展开研究,梳理相关理论基础与技术演进,提出复杂工况下的改进建模方法,设计适配的优化控制策略并进行理论验证。研究成果可为提升机电系统综合性能提供理论支撑与技术参考,对推动机电系统相关领域的技术发展具有重要意义。

关键词: 机电系统;动力学建模;优化控制;多场耦合

DOI: 10.69979/3029-2727.25.06.074

引言

机电系统在现代工业生产、智能装备研发等领域占据核心地位,广泛应用于数控机床、工业机器人、智能生产线等关键装备中,其性能优劣直接关系到生产效率与产品质量。当前,在智能制造发展浪潮下,机电系统面临高速运行、高精度控制等严苛要求,随之出现动力学特性复杂、参数时变显著、多场耦合干扰等问题,传统技术方案难以有效解决。梳理国内外研究现状发现,现有建模与控制研究在应对复杂工况时存在适配性不足、鲁棒性欠佳等缺陷。

1 建模理论基础与技术演进

1.1 核心理论框架

机电系统动力学建模的核心理论框架以经典力学、电磁学、控制理论等学科为基础,整合了机械系统的动力学分析与电气系统的电路分析方法。该框架明确了机电系统中机械运动与电气信号之间的耦合关系,为建立统一的动力学模型提供了理论依据。在实际建模过程中,需基于能量守恒定律、牛顿运动定律、基尔霍夫定律等基本原理解释,梳理系统各组成部分的力学与电学特性。通过理论框架的指导,可以明确建模的核心要素与关键环节,有效规避建模过程中的逻辑漏洞。

1.2 传统建模方法特性

传统机电系统动力学建模方法主要包括机理建模法、实验建模法与混合建模法。机理建模法通过分析系统内部结构与工作原理建立数学模型,具有物理意义明确的优势,但建模过程复杂,对系统结构认知要求较高,适用于结构相对简单的机电系统。实验建模法基于系统输入输出数据构建模型,无需深入了解系统内部机理,

建模效率较高,但模型的泛化能力较弱,受实验条件影响较大。混合建模法结合了机理建模与实验建模的优点,在一定程度上弥补了单一建模方法的不足,但建模流程更为繁琐,在复杂系统中应用难度较大。

1.3 建模技术发展趋势

随着机电系统复杂度的不断提升,动力学建模技术呈现出多学科融合、智能化、精细化的发展趋势。多学科融合趋势体现在建模过程中整合机械、电气、材料、控制等多学科知识,以应对多场耦合等复杂问题。智能化趋势表现为引入人工智能、机器学习等技术,实现建模过程的自动化与智能化,提升模型构建效率与准确性。精细化趋势则要求建模工作更加注重系统细节特性,考虑参数时变、非线性等因素对系统动力学特性的影响,构建高精度的动力学模型。

2 复杂工况下建模方法研究

2.1 多场耦合建模方法

多场耦合是复杂工况下机电系统的典型特性,涉及机械场、电场、磁场、温度场等多个物理场的相互作用,这种相互作用往往呈现出非线性、强耦合的特点,直接影响系统的运行稳定性、精度和寿命。针对这一特性,提出基于场耦合理论的建模方法,通过深度剖析各物理场之间的耦合机理,明确能量传递、动量交换及物理量耦合的内在规律,建立能够精准刻画耦合效应的多场耦合动力学模型。该方法首先基于经典物理定律明确各物理场的数学描述方程,包括机械场的振动方程、电场的电磁场方程、温度场的热传导方程等,再通过耦合系数定量表征场与场之间的相互作用关系,将各场模型有机整合形成统一的耦合模型框架。在建模过程中,需结合

有限元分析、试验测试等手段,系统研究不同工况下耦合系数的变化规律,重点考量负载突变、环境温度湿度波动等极端工况对耦合效应的影响,通过多次迭代校准模型参数,确保模型能够准确反映多场耦合对系统动力学特性的影响,为后续系统性能优化和控制策略设计提供可靠的模型支撑。

2.2 参数时变建模改进

参数时变是机电系统在长期运行过程中普遍存在的现象,受温度变化、磨损、负载波动等因素影响,系统参数会发生动态变化,导致传统固定参数模型的精度下降。针对这一问题,提出基于自适应机制的参数时变建模改进策略。该策略通过在线监测系统运行状态,实时获取系统参数变化信息,建立参数时变模型。采用递推辨识算法对时变参数进行实时估计与更新,确保模型参数能够跟随系统实际运行状态动态调整。同时,引入鲁棒辨识方法,降低外界干扰对参数估计精度的影响。该改进策略有效提升了模型对参数时变特性的适配能力,使模型能够准确反映系统在不同运行阶段的动力学特性。

2.3 建模误差补偿与修正

建模误差是机电系统动力学建模过程中难以避免的问题,主要来源于简化假设、参数测量误差、未建模动态等因素。为降低建模误差对模型精度的影响,研究建模误差补偿与修正方法。首先通过灵敏度分析识别导致建模误差的关键因素,明确各因素对误差的影响程度。在此基础上,设计基于误差预测的补偿策略,通过建立误差预测模型对建模误差进行实时预测与补偿。同时,提出模型在线修正方法,结合系统实际运行数据与模型输出数据的偏差,对模型参数进行动态修正。通过误差补偿与模型修正,有效提升了动力学模型的精度,使模型能够更好地贴合机电系统的实际运行特性。

3 优化控制策略设计

3.1 优化控制目标构建

基于机电系统动力学模型,结合系统实际运行需求,构建多目标优化控制目标体系。该体系以提升系统运行精度、增强稳定性、降低能耗为核心目标,同时兼顾系统响应速度与控制成本等辅助目标。在目标构建过程中,采用层次分析法明确各目标的权重,根据系统不同运行工况对目标权重进行动态调整。通过建立目标函数对各优化目标进行量化描述,将多目标优化问题转化为单目标优化问题。同时,考虑系统运行过程中的约束条件,

如输入电压限制、机械行程限制等,确保优化控制目标的可行性。

3.2 智能优化控制算法

针对复杂工况下机电系统动力学特性的非线性、参数时变等特点,设计适配的智能优化控制算法。引入模糊控制与PID控制相结合的复合控制算法,利用模糊控制对非线性、不确定性系统的良好适配性,实时调整PID控制器的参数,提升控制器对系统动态特性变化的响应速度。同时,融入粒子群优化算法对模糊控制规则与PID参数初始值进行优化,提高控制算法的优化性能与鲁棒性。该智能优化控制算法无需精确的系统数学模型,能够通过在线学习不断优化控制策略,有效应对系统动力学特性的复杂变化。

3.3 控制稳定性与鲁棒性

控制策略的稳定性与鲁棒性是保障机电系统安全稳定运行的关键。采用Lyapunov稳定性理论对所设计的优化控制策略进行稳定性分析,通过构造合适的Lyapunov函数,证明控制策略能够使系统在不同工况下均保持稳定运行状态。针对系统运行过程中可能遇到的外界干扰与参数摄动,开展鲁棒性分析,明确控制策略对干扰与参数变化的抵御能力。通过引入干扰观测器,对外部干扰进行实时估计与补偿,进一步提升控制策略的鲁棒性。同时,对控制策略的稳定性与鲁棒性进行边界分析,确定系统稳定运行的参数范围与干扰阈值。

4 建模与控制理论验证

4.1 模型准确性验证

采用理论分析与仿真对比相结合的方法对动力学模型的准确性进行验证。首先基于所建立的力学模型,通过理论推导得到系统的动态响应特性,包括阶跃响应、频率响应等。然后构建仿真模型,设置与理论分析相同的初始条件与输入参数,获取仿真响应结果。将理论推导结果与仿真结果进行对比分析,通过偏差分析量化模型的准确性。同时,考虑不同运行工况下的模型表现,选取典型工况进行针对性验证,确保模型在全工况范围内均具有较高的准确性。通过模型准确性验证,明确所提出的建模方法的有效性,为后续控制策略的验证提供可靠的模型基础。若验证过程中发现模型存在偏差,及时反馈至模型修正环节,进一步优化模型精度。

4.2 控制性能指标评估

基于动力学模型构建控制仿真平台,对所设计的优化控制策略的性能指标进行评估。选取运行精度、响应

时间、超调量、稳态误差、抗干扰能力等关键性能指标作为评估依据,制定科学合理的评估标准。在不同运行工况下,通过仿真实验获取控制策略的各项性能指标数据,与传统控制策略的性能指标进行对比分析。评估结果表明,所设计的优化控制策略在各项性能指标上均优于传统控制策略,能够有效提升机电系统的运行精度与稳定性,降低系统能耗。通过性能指标评估,全面掌握控制策略的控制效果,为控制策略的工程应用提供数据支撑与理论依据。

4.3 工况适配性验证

为验证建模与控制方案在复杂工况下的适配性,选取多场耦合、参数时变、负载突变等典型复杂工况开展验证研究。在各典型工况下,将所建立的动力学模型与优化控制策略应用于仿真系统,观察系统的运行状态与控制效果。分析不同复杂工况下模型输出与实际系统运行状态的偏差,评估模型的工况适配能力。同时,考核控制策略在复杂工况下的控制精度与稳定性,判断控制策略是否能够有效应对工况变化带来的影响。通过工况适配性验证,证明所提出的建模与控制方案能够较好地适配复杂工况需求,在各种复杂工况下均能保证机电系统的稳定、高精度运行。

5 应用适配研究

5.1 建模方案适配分析

不同类型的机电系统在结构组成、运行特性、工况需求等方面存在差异,对建模方案的适配性提出不同要求。开展不同类型机电系统的建模方案适配性分析,选取数控机床、工业机器人、智能执行器等典型机电系统作为研究对象。针对各类型系统的结构特点与运行工况,分析所提出的建模方法在不同系统中的适用性,明确建模方案的调整方向。对于结构复杂、多场耦合显著的系统,强化多场耦合建模环节;对于参数时变明显的系统,优化参数时变建模策略。通过适配性分析,为不同类型机电系统提供针对性的建模方案,提升建模方法的通用性与实用性。

5.2 控制策略工程适配

为推动优化控制策略的工程应用,开展控制策略的参数整定与工程适配方法研究。结合工程实际应用场景,分析影响控制策略参数的关键因素,提出基于工程经验与仿真优化相结合的参数整定方法。该方法首先根据工程经验确定参数初始范围,再通过仿真实验对参数进行精细优化,确保参数能够适配工程实际需求。同时,考

虑工程应用中的硬件限制、成本约束等因素,对控制策略进行简化与优化,提升控制策略的工程可实现性。开展控制策略的工程适配测试,验证控制策略在实际工程系统中的运行效果,及时发现并解决适配过程中存在的问题。通过工程适配研究,加速控制策略的工程转化,提升其实际应用价值。

5.3 一体化方案简化应用

建模与控制一体化方案的简化与工程应用探索是提升方案实用性的关键。针对工程应用中对建模与控制流程简洁性的需求,对建模与控制一体化方案进行简化,优化流程环节,减少不必要的计算步骤,提升方案的运行效率。采用模块化设计思想,将一体化方案划分为建模模块、控制模块、验证模块等独立模块,便于方案的调试、维护与升级。开展一体化方案的工程应用试点,选取典型工程场景进行应用测试,收集应用过程中的数据与反馈信息。根据应用反馈对一体化方案进行进一步优化,完善方案的工程适配性。通过简化与应用探索,使建模与控制一体化方案能够更好地满足工程实际需求,推动其在更多机电系统中的广泛应用。

6 结论

本文围绕机电系统动力学建模与优化控制展开系统研究,梳理了机电系统动力学建模的理论基础与技术演进趋势,明确了传统建模方法的局限性。针对复杂工况下的多场耦合、参数时变等问题,提出了改进的动力学建模方法,设计了适配的智能优化控制策略,并通过理论分析与仿真验证了建模方法的准确性与控制策略的有效性。开展了不同类型机电系统的应用适配研究,提出了建模方案与控制策略的工程适配方法,为一体化方案的工程应用提供了可行路径。研究成果为提升机电系统的运行精度、稳定性与能效提供了理论支撑与技术参考。

参考文献

- [1]康晨祺. 基于旋转机械的机电系统动力学建模分析[J]. 科技资讯, 2025, 23(01): 87-89.
- [2]吴诚昊. 机电悬架动力学建模及其控制系统研究[D]. 合肥工业大学, 2024.
- [3]陈哲钢. 数控机床进给系统机电耦合建模及性能分析[D]. 天津工业大学, 2023.
- [4]冯桂珍. 轮毂电机驱动电动汽车-路面系统动力学建模及振动分析[D]. 石家庄铁道大学, 2022.