

机电一体化系统设计与优化研究

王宪涛¹ 王云瑞² 刘志超¹ 苏川川¹

1. 山东国华时代投资发展有限公司 山东 济南 250000

2. 中建八局第一建设有限公司 山东 济南 250000

摘要: 本文以机电一体化系统为研究对象,系统阐述其核心理论、组成架构与关键优化技术,依托分层模块化设计思路完成系统整体方案设计与子系统细化开发。通过仿真测试梳理传统设计存在的定位偏差、动态超调、能耗损耗及运行振动等问题,从机械结构、电气参数、传感驱动与智能控制算法多维度开展优化改进。仿真结果表明,优化方案可有效提升系统控制精度、运行稳定性与节能水平,为工业机电装备升级优化提供可靠理论与工程参考。

关键词: 机电一体化;系统设计;优化

引言: 智能制造与工业自动化的高速发展,推动机电一体化装备向高精度、高稳定性、智能化与低能耗方向迭代升级。机电一体化系统融合多类核心技术,是工业生产、精密加工、智能仓储等领域的核心装备。传统设计模式存在机电耦合适配性差、工况适应性弱、动态响应不足等缺陷,难以满足现代化生产严苛指标。基于此,本文开展机电一体化系统全流程设计与多维度优化研究,依托仿真技术实现性能迭代提升,助力高端机电装备产业化应用。

1 机电一体化系统核心理论与关键技术

1.1 机电一体化系统基本概述

(1) 系统定义与组成结构: 机电一体化系统是将机械技术、电子技术、传感检测技术、驱动控制与信息处理深度融合的复合系统。其五大核心模块包括: 机械结构(执行动作与承载基体)、电气控制(信号处理与逻辑决策)、传感检测(感知内外状态)、驱动执行(能量转换与运动输出)、信息处理(数据融合与智能运算)。各模块通过接口协同,形成完整功能闭环^[1]。

(2) 系统核心特性: 集成性(多技术有机融合而非简单叠加)、智能化(具备自感知、自决策能力)、高精度(定位与控制误差可达微米级)、柔性化(适应多品种小批量生产)、实时控制性(对动态输入快速响应,确保系统稳定可靠)。(3) 主流应用场景: 广泛覆盖工业自动化生产线(如装配、焊接)、智能机器人(工业机械臂与服务机器人)、精密加工设备(数控机床、激光加工机)、智能仓储装备(AGV、自动化立体仓库)等领域,显著提升生产效率与质量。

1.2 系统设计基础理论

(1) 分层设计理论: 构建需求分析层(明确功能与性能指标)、概念设计层(提出总体架构方案)、详细

设计层(细化机械/电气/控制参数)、调试优化层(实物验证与参数整定)四层设计体系,逐层分解设计风险,保障开发质量与进度可控。(2) 模块化设计原理: 遵循功能独立(单模块高内聚低耦合)、接口统一(标准化机械电气通信接口)、可拓展(预留升级余量与兼容性)的模块划分原则,便于并行开发、独立测试与后期维护升级。(3) 多学科协同设计理论: 强调机械、电子、控制、计算机领域知识的交叉融合,通过联合仿真平台与协同设计流程,有效解决跨领域耦合问题,实现系统整体性能最优。

1.3 系统优化关键技术

(1) 系统建模技术: 包括动力学建模(刚柔耦合特性分析)、电气控制建模(传递函数与状态空间描述)、多域混合建模(机电液热多能域耦合),为优化提供准确的数学描述基础。(2) 智能优化算法: 遗传算法用于参数全局寻优,粒子群算法适用于多目标快速收敛求解,自适应优化算法可根据工况动态调整策略,有效提升系统响应速度与鲁棒性。(3) 仿真验证技术: 借助MATLAB(控制策略仿真与算法验证)、ADAMS(多体动力学仿真与运动分析)等平台,在虚拟环境下进行系统性能测试与故障预判,显著缩短开发周期,降低实体试错成本。

2 机电一体化系统总体设计与模块实现

2.1 系统设计需求分析与指标确定

(1) 功能需求分析: 深入调研目标作业场景,通过用户需求映射与任务流程分解,明确加工(切削参数、工艺路线、表面质量)、传动(运动形式、速比范围、动力传递路径)、控制(轨迹规划、力/位混合控制、安全联锁逻辑)、检测(位置反馈、力觉感知、温度监测、故障自诊断)等核心功能要求,形成完整

的功能树与作业时序图,作为后续设计的输入基础。

(2) 性能指标设定:将定性需求转化为可量化的技术参数体系,包括定位精度(重复定位 $\pm 0.01\text{mm}$,绝对定位 $\pm 0.05\text{mm}$)、运行速度(快进 $\geq 60\text{m/min}$,工进 $0.1\sim 10\text{m/min}$)、能耗(额定功率及待机功耗)、稳定性(振动幅值 $\leq 0.005\text{mm}$,超调量 $\leq 5\%$,稳态误差 $\leq 0.001\text{mm}$)、响应速度(阶跃上升时间 $\leq 50\text{ms}$,调节时间 $\leq 150\text{ms}$),明确各指标测试工况与允差范围,建立性能评价矩阵^[2]。(3) 约束条件分析:系统梳理各类限制因素,包括成本(采购与制造成本上限)、安装空间(外形尺寸与接口方位限制)、运行环境(温度、湿度、粉尘浓度、电磁兼容等级)、维护难度(易损件更换周期、平均修复时间),同时兼顾技术成熟度与人机安全法规,确保方案工程可行且经济合理。

2.2 系统总体架构方案设计

(1) 总体架构布局:依据功能需求与约束条件,确定系统整机拓扑结构,明确动力源 $\rightarrow$ 传动链 $\rightarrow$ 执行末端的主功率路径,以及传感反馈 $\rightarrow$ 控制器 $\rightarrow$ 驱动器的信息流回路,合理划分物理层、控制层与信息层功能区域,统筹紧凑性布局与散热、线缆走线、维护通道的空间预留。(2) 子系统模块划分:将系统拆解为机械传动模块(导轨、丝杠、减速器、联轴器)、电气控制模块(控制器、I/O、通信单元、电源管理)、传感检测模块(位移/速度/力觉/视觉传感器及调理电路)、驱动执行模块(伺服电机、驱动器、制动器)等独立子系统,各模块边界清晰、功能内聚,便于并行开发与独立测试。(3) 模块接口设计:统一各模块的机械接口(安装定位尺寸、销钉定位、螺栓规格与扭矩)、电气接口(供电电压、信号电平、连接器引脚定义、屏蔽接地)、通信接口(总线协议如EtherCAT/CANopen、数据帧格式、通信速率、同步时钟精度),形成接口控制文档,确保模块间即插即用与系统级协同运行。

2.3 核心子系统详细设计

(1) 机械结构子系统设计:根据载荷谱与运动参数,完成传动结构(滚珠丝杠/齿轮齿条选型、强度校核与寿命计算)、支撑结构(机架材料与有限元刚度分析、轴承配置与预紧方式)、运动机构(关节铰点优化、导轨精度等级确定、润滑密封设计)的详细设计,输出三维模型、工程图纸及关键公差标注。(2) 电气控制子系统设计:依据I/O点数与算法复杂度选定控制器(PLC/运动控制卡/嵌入式ARM方案),规划强弱电隔离、滤波与屏蔽接地,编写结构化控制程序(梯形图/ST/C语言),涵盖主循环调度、中断服务、故障诊断与安

全保护,实现精确定位插补与多轴协同运动^[3]。(3) 传感检测与驱动子系统设计:根据精度与带宽选配传感器(光栅尺/编码器/测力传感器/视觉相机),设计信号调理与抗混叠滤波;依据负载惯量与扭矩选配伺服电机与驱动器,完成惯量匹配与电子齿轮比设定,通过阶跃响应与频率响应法整定速度环/位置环PID参数,确保动静态特性达标。

2.4 系统初始性能仿真分析

(1) 仿真模型搭建:将详细设计所得机械刚度/阻尼/惯量参数、电气时间常数、控制算法及传感特性导入多域仿真平台(MATLAB/Simulink联合ADAMS或ANSYS TwinBuilder),建立刚柔耦合动力学、电机电磁特性、数字控制与量化噪声的整体模型,设定边界条件与典型工况负载谱。(2) 初始性能测试:运行仿真模型,按测试方案记录典型工况(加速/匀速/减速、变负载、极限速度)下的定位精度曲线、阶跃/斜坡响应速度、能耗分布及振动功率谱密度,对照3.1节量化指标逐项评估符合性,标注超标项及其偏差量。(3) 初始问题梳理:基于仿真数据系统总结设计方案存在的不足,如传动链弹性变形与反向间隙导致定位偏差超差、PID参数整定欠优引起超调过大且振荡增多、加减速力矩冲击造成能耗偏高、传感器量化噪声引入微小振动等问题,按严重程度优先级分类归纳,为后续参数迭代与结构改进提供明确方向。

3 机电一体化系统多维度优化与效果验证

3.1 系统优化总体思路与优化目标

(1) 优化原则:确立兼顾实用性(满足作业功能需求,不牺牲核心能力)、经济性(控制成本增幅在可接受范围内)、稳定性(提升抗干扰能力与运行平稳性)、节能性(降低能耗与能量浪费)的多目标优化原则,在各指标间寻求综合最优平衡,避免单一指标过度优化导致系统失衡^[4]。(2) 优化维度:构建结构优化(拓扑减重、刚度提升、阻尼改善)、控制算法优化(参数自整定、智能策略引入)、参数匹配优化(机械惯量与电机参数匹配、传动比优化)、能耗优化(加减速曲线规划、能量回收策略)四大核心维度,各维度协同推进,形成系统性优化方案。(3) 优化评价标准:建立三层量化评价指标体系——性能评价层(定位精度、响应速度、超调量、稳态误差)、能耗评价层(单位周期能耗、峰值功率、待机功耗)、可靠性评价层(振动幅值、温升限值、平均无故障时间),每项指标明确定义测试工况与计算方法,确保优化效果可客观衡量。

3.2 系统关键模块优化设计

(1) 机械结构优化:优化传动结构参数(丝杠导

程与预紧力重新匹配、传动比调整以适配负载特性），通过有限元拓扑分析简化冗余支撑结构，引入轻量化材料降低运动部件惯量；优化导轨润滑方式与密封结构，减小摩擦系数与机械磨损，提升传动效率与疲劳寿命。

（2）电气参数优化：精确匹配电气元件参数（滤波器截止频率、稳压电容容值、功率开关管选型），优化电路布局走线（强弱电分区隔离、信号线屏蔽层单端接地），减少电磁干扰与线路耦合损耗；调整PWM开关频率与供电电压等级，降低功率器件开关损耗与导通损耗。（3）传感与驱动模块优化：优化传感器安装位置（靠近测量端布置、配备减振支架）与检测方向，减小振动传递误差；调整驱动器电流环/速度环增益系数、优化电子齿轮比以匹配负载惯量特性曲线，提升检测信噪比与执行端定位精度。

3.3 控制算法优化改进

（1）传统控制算法缺陷分析：传统PID控制在系统存在纯滞后环节时相位裕度不足，参数固定导致变工况条件下适应性差；积分饱和易引起超调显著增大，微分环节对高频噪声敏感放大，抗外部扰动能力有限，难以满足高精度快速响应与变负载运行的控制需求。（2）自适应智能控制算法设计：融合模糊逻辑推理与PID控制（模糊自适应PID），实现控制参数在线自整定；引入滑模变结构控制增强系统鲁棒性，结合前馈补偿策略抑制已知确定性扰动，有效提升系统动态响应速度与抗干扰性能，显著改善非线性时变工况下的控制品质^[5]。（3）算法参数迭代优化：基于系统实际运行特性曲线，通过仿真平台进行多轮参数迭代调试，利用粒子群优化算法在约束空间内搜索全局最优参数组合，结合工程经验边界约束，经收敛性判断后确定适配系统特性的最优控制参数集，确保算法性能充分发挥。

3.4 优化后系统仿真验证与结果分析

（1）优化后仿真模型更新：将结构改进参数（刚度/阻尼/惯量）、电气匹配参数（滤波器/开关频率）、优化

后的控制算法模块嵌入原仿真模型，保持边界条件与负载输入完全一致，确保前后对比基准统一，模型准确性经校验确认。（2）性能对比测试：在相同测试工况下运行优化后模型，提取精度曲线、响应时间、能耗数据及振动频谱，与优化前仿真结果逐项对比——记录定位偏差缩小幅度、超调量下降比率、调节时间缩短量及单位周期节能百分比，生成量化对比表与曲线叠加图，直观呈现改进效果。（3）优化效果综合分析：综合验证结果表明，结构优化有效降低惯量与摩擦损耗，控制算法改进显著提升动态响应，参数匹配优化减少了能量损耗，各项指标均达到预设评价标准。同时分析仍存在的局限性（如极端变负载工况下自适应算法收敛速度受限、轻量化结构在极限频率下刚度余量略显不足），指明后续持续改进方向与重点攻关内容。

结束语

本文完成了机电一体化系统从理论分析、方案设计、仿真验证到多维优化的完整研究，有效解决了传统系统定位偏差大、动态稳定性弱、能耗偏高的痛点，显著改善系统动静态运行性能。研究验证了结构改良、参数匹配与智能算法结合的优化方案的可行性。同时研究发现极端工况下系统仍存在短板，后续可聚焦自适应算法迭代与极限工况结构优化，进一步完善系统综合性能。

参考文献

- [1]刘玉梅.基于物联网的机电一体化运动控制仿真系统设计[J].电子元器件与信息技术,2025,9(06):190-193.
- [2]王娜娜,马飞,樊龙龙.基于PLC技术的机电一体化设备智能控制探究[J].产业创新研究,2024,16(22):121-123.
- [3]赵成龙.工业自动化中机电一体化系统的集成与优化[J].造纸装备及材料,2024,53(03):44-46.
- [4]刘丽.智能控制技术在机电一体化系统中的应用[J].造纸装备及材料,2023,52(09):107-109.
- [5]刘晋飞,马学明,李杰林,等.基于MDP的可靠性数字孪生任务决策[J].机电一体化,2022,28(02):22-28.