

模块化机械臂设计与运动控制实现

陈琼光¹ 王响² 徐宝伟¹

1. 沈阳庆恒华泰自动化成套设备有限公司 辽宁沈阳 110026

2. 沈阳鑫伟仁邦自动化设备有限公司 辽宁沈阳 110078

摘要: 本文聚焦模块化机械臂的设计与运动控制, 阐述模块化设计理念(功能独立、接口标准化), 构建由关节(谐波减速器/滚珠丝杠)、臂杆(铝合金蜂窝结构)及六自由度串联构型组成的机械结构, 搭配伺服电机与“电机+减速器”传动系统。通过D-H参数法分析运动学, 基于拉格朗日方程建立动力学模型, 采用PID、自适应及智能控制策略。硬件搭载DSP控制器与CANopen通信总线, 软件实现模块化算法与GUI交互。性能测试显示定位精度 $\pm 0.05\text{mm}$ 、轨迹误差 $< \pm 1\text{mm}$, 验证设计有效性, 为工业应用提供理论与实践参考。

关键词: 模块化机械臂; 运动控制; 结构设计; 性能测试

一、模块化机械臂设计原理

(一) 模块化设计理念

1. 模块划分原则

模块化设计遵循功能独立性、接口标准化、维护便捷性原则。将机械臂拆解为关节模块、臂杆模块、驱动模块等独立单元, 各模块可单独设计、制造与更换, 通过标准化接口实现快速组装与重构, 以适应不同作业场景的需求。

2. 模块接口设计

接口设计需满足机械连接强度、传动精度与电气通信的可靠性。机械接口采用高精度定位销与螺栓组合, 确保模块间刚性连接; 电气接口采用标准化接插件, 实现电源与信号的快速导通, 同时设计防误插结构以提升系统安全性^[1]。

(二) 机械结构设计

1. 关节结构设计

关节模块作为机械臂的运动核心, 采用旋转关节与平移关节相结合的形式。旋转关节基于谐波减速器实现高传动比与低回差, 适用于大范围角度运动; 平移关节采用滚珠丝杠传动, 满足直线运动精度需求。关节内部

集成功率传感器, 用于实时监测负载状态。

2. 臂杆结构设计

臂杆采用轻质高强度铝合金材料, 内部设计蜂窝状减重结构, 在保证刚度的同时降低整体质量。臂杆末端设置通用安装接口, 可快速更换夹爪、喷枪、摄像头等执行器, 拓展机械臂的作业功能。

3. 整体构型设计

根据作业空间需求, 机械臂采用六自由度串联构型, 包括基座、大臂、小臂与腕部模块。各模块通过关节连接形成开链式运动链, 可实现空间内任意位姿的灵活调整, 满足复杂轨迹作业要求。

(三) 驱动与传动系统设计

1. 驱动电机选型

驱动电机选用低惯量、高转矩密度的伺服电机, 根据关节负载特性配置不同功率等级: 基座关节采用大功率电机以支撑整体重量, 腕部关节采用小功率电机实现精细动作。电机内置编码器, 用于实时反馈关节位置与速度^[2]。

2. 传动装置设计

模块化机械臂传动系统采用“电机+减速器+联轴器”组合方案确保动力传递精准可靠: 高精度关节(如腕部、小臂)选用谐波减速器, 传动比50-300、回差 ≤ 1 弧分, 满足精密定位; 大扭矩关节(如基座、大臂)采用齿轮减速器, 通过多级斜齿轮传动提升扭矩, 最大承载扭矩达 $500\text{N}\cdot\text{m}$ 。联轴器采用含弹性橡胶元件的挠性结构, 可补偿轴向 $\pm 0.2\text{mm}$ 、径向 $\pm 0.1\text{mm}$ 及角向

作者简介:

1. 陈琼光(1981.03--), 女, 汉族, 辽宁沈阳人, 职务/职称: 中级职称, 学历: 本科;

2. 王响(1996.09--), 男, 汉族, 辽宁锦州人, 职务/职称: 机械设计, 学历: 本科。

$\pm 1.5^\circ$ 安装误差, 吸收冲击振动、避免应力集中。该方案通过差异化选用减速器与弹性联轴器柔性连接, 保证谐波减速器 $\eta \geq 60\%$ 、齿轮减速器 $\eta \geq 85\%$ 的传动效率, 提升运动平稳性与抗干扰能力, 适用于精密装配至重载作业多场景。

二、模块化机械臂运动控制实现

(一) 硬件系统搭建

1. 控制器选型

模块化机械臂的控制器选用基于 DSP 的运动控制卡, 其核心优势体现在多轴协同控制与实时任务调度能力: 该控制卡集成 4-8 轴伺服控制通道, 支持脉冲+方向、模拟量等多种驱动接口, 可直接适配谐波减速器、伺服电机等执行单元; 内置实时操作系统 (RTOS), 通过优先级队列与中断管理机制, 确保轨迹规划、PID 控制等关键任务的微秒级响应 (控制周期 $\leq 1\text{ms}$), 避免因任务调度延迟导致的运动失步。通信层面, 通过以太网接口 (100Mbps) 与上位机建立 TCP/IP 连接, 可实时传输关节状态、故障代码等 50 余类数据, 并支持远程在线参数调试与程序升级。硬件设计采用全金属屏蔽封装, 抗振动等级达 10-500Hz (0.5g), 满足工业现场复杂电磁环境下的稳定运行需求, 为机械臂的高精度运动控制提供了可靠的硬件平台^[3]。

2. 传感器选型与安装

模块化机械臂的传感器系统通过多类型感知组件实现精准反馈与环境交互: 关节处集成高精度绝对值编码器, 分辨率达 17 位 (约 0.0054°), 实时测量关节角度与角速度, 为运动学解算提供基础数据; 腕部安装六维力传感器, 可同步检测三维力 ($\pm 50\text{N}$) 与三维力矩 ($\pm 10\text{N}\cdot\text{m}$), 用于装配、打磨等接触式作业中的力控反馈; 视觉摄像头采用工业级 USB3.0 接口相机 (分辨率 1280×960), 通过手眼标定算法建立摄像头坐标系与机械臂基坐标系的转换关系, 实现目标物体的视觉定位与位姿检测。三类传感器分别通过 CANopen 总线与 USB 接口接入控制器, 形成“位置-力-视觉”多模态感知网络, 有效提升机械臂在精密操作、人机协作等场景中的环境适应性与作业灵活性。

3. 通信系统设计

模块化机械臂的通信系统基于 CANopen 总线协议构建, 实现控制器与伺服驱动器、传感器间的实时数据交互。总线采用分布式节点拓扑设计, 各模块 (如关节驱动单元、力传感器) 作为独立节点接入网络, 支持即

插即用的热插拔功能, 便于系统扩展或故障模块快速更换。通信协议支持周期性数据传输 (如关节位置、电机状态) 与非周期性指令交互 (如参数配置、故障复位), 数据更新频率可达 1kHz, 确保控制指令与传感器反馈的低延迟传输。此外, 总线设计具备冗余校验机制, 通过 CRC 校验与错误帧重传功能提升通信可靠性, 适用于工业现场的强电磁干扰环境, 为机械臂的模块化重构与稳定运行提供了灵活高效的通信保障。

(二) 软件系统设计

1. 控制算法实现

模块化机械臂的控制算法实现基于模块化编程思想, 在控制器软件中构建分层控制架构: 通过运动学反解算法求解末端位姿对应的关节角度, 结合 D-H 参数模型实现从笛卡尔空间到关节空间的映射; 采用增量式 PID 控制器实现关节位置闭环控制, 通过比例系数调节动态响应速度, 积分环节消除稳态误差, 微分环节抑制超调量。针对机械臂惯性参数时变特性, 引入自适应补偿算法在线辨识质量矩阵与科里奥利力参数, 实时调整控制增益以补偿负载变化影响。通过任务调度器实现多任务并行执行, 将轨迹规划、传感器数据采集 (如编码器、力传感器)、控制输出等任务分配至独立线程, 利用实时操作系统 (RTOS) 的优先级调度机制确保关键任务 (如控制周期) 的微秒级响应, 系统实时性误差控制在 $\pm 10\mu\text{s}$ 以内, 保障多轴协同运动的同步性与轨迹跟踪精度^[4]。

2. 人机交互界面设计

模块化机械臂的人机交互界面设计依托上位机图形化用户界面 (GUI) 实现高效操作与监控: 界面集成运动参数设置模块, 支持用户自定义关节速度、加速度等控制参数; 轨迹示教功能可通过示教盒手动拖动机机械臂记录作业路径, 或通过坐标输入生成自定义轨迹。状态监控模块实时显示机械臂末端位姿、关节角度/力矩、电机电流等 30 余项运行参数, 并以曲线图表形式动态呈现数据变化趋势。故障诊断系统内置 20 类常见异常知识库, 可根据传感器反馈数据自动识别机械臂卡滞、过载、通信中断等故障, 实时触发声光报警并生成故障代码日志。此外, 界面支持多语言切换与操作权限分级管理, 满足不同场景下的人机协作需求, 显著提升机械臂的易用性与操作安全性。

3. 系统调试与优化

模块化机械臂通过多维度测试优化性能: 关节控制上, 经阶跃响应测试调整 PID 参数, 关节动态响应速度

提升20%，超调量降至5%以内，优化位置控制快速性与平稳性；运动学算法验证中，针对轨迹跟踪实验出现的 $\pm 1.5\text{mm}$ 偏差，通过参数标定与补偿，将轨迹精度提升至 $\pm 0.8\text{mm}$ ；不同负载工况下，结合自适应控制调整参数，使满载轨迹跟踪误差降低35%，提升变负载鲁棒性。“测试-分析-优化”循环实现控制性能与可靠性系统性提升。

三、模块化机械臂性能测试与分析

(一) 性能测试方案制定

模块化机械臂的性能测试方案围绕典型工况展开，覆盖多维度评估需求：针对单关节定位精度，通过控制单个关节运动至指定角度，利用激光干涉仪精准测量末端定位误差，验证传动系统（如谐波减速器、滚珠丝杠）的精度性能；多关节联动轨迹跟踪测试中，设定圆弧、直线等典型空间轨迹，通过数据采集系统实时记录各关节力矩与末端轨迹偏差数据，考核运动学算法与控制策略的协同性；负载能力测试通过逐级增加末端负载，监测臂杆形变与关节驱动电机的电流、扭矩变化，确定机械臂的额定负载阈值；抗干扰能力测试则在机械臂运动过程中引入外部扰动（如气流、振动），通过分析轨迹偏差波动情况，评估控制系统的鲁棒性。整套方案采用激光干涉仪与数据采集系统相结合的手段，实现对定位误差、力矩、轨迹偏差等关键参数的量化分析，为机械臂性能的科学评估提供数据支撑。

(二) 测试结果与分析

模块化机械臂的性能测试结果验证了设计的有效性：单关节定位精度达 $\pm 0.05\text{mm}$ ，满足精密装配、微电子操作等高精度作业需求，体现了谐波减速器与滚珠丝杠传动的高精度优势。多关节联动执行圆弧、螺旋线等典型空间曲线轨迹时，末端轨迹跟踪误差小于 $\pm 1\text{mm}$ ，表明基于D-H参数法的运动学建模与PID+自适应控制算法协同有效，保障了复杂场景下的路径精度。在额定负载测试中，臂杆最大形变仅 0.28mm ，结构刚性符合设计要求；通过拉格朗日方程建立的动力学补偿算法，将重力引起的轨迹偏差从 $\pm 2.5\text{mm}$ 降至 $\pm 0.5\text{mm}$ ，误差抑制率达80%，显著提升了低速重载时的控制稳定性。各项数据表明，机械臂的结构设计、驱动选型及控制策略均达工程应用标准，为其在工业自动化、医疗康复等领域的实际应用提供了可靠支撑。

(三) 优化措施与建议

针对模块化机械臂在高速运动、轨迹跟踪精度及

复杂作业场景中暴露的问题，可采取以下优化措施与建议：高速运动振动抑制方面，在臂杆内部添加压电陶瓷阻尼片或粘弹性阻尼材料吸收振动能量，同时优化蜂窝结构拓扑、增加应力集中区加强筋，并采用变截面设计调整杆体厚度，预计降低振动幅值30%~50%，提升轨迹稳定性。

提升轨迹跟踪精度时，引入迭代学习控制算法，通过记录误差迭代优化补偿输入；结合模型预测控制滚动优化多关节动力学，提前补偿非线性因素；针对强时变负载融合自适应与滑模控制，可将重复轨迹误差从 $\pm 1\text{mm}$ 降至 $\pm 0.5\text{mm}$ 内，满足精密需求^[5]。

复杂场景应用中，融合视觉与力觉传感器，通过手眼标定和六维力传感器实现目标定位与接触力感知，开发模糊逻辑柔顺控制策略切换控制模式，并引入强化学习自主生成轨迹，提升非结构化环境适应性。工程上可将优化组件模块化设计，便于拆装升级，通过多学科仿真预判瓶颈，经长期可靠性测试验证方案可行性，全面提升机械臂性能。

结论

本文完成了模块化机械臂的结构设计与运动控制实现，通过模块化设计提升了系统的灵活性与可维护性，基于多种控制策略实现了高精度运动控制。性能测试表明，机械臂各项指标满足设计要求，为其在工业自动化等领域的应用奠定了基础。未来可进一步研究人机协作控制与自主导航技术，拓展机械臂的智能化水平。

参考文献

- [1] 戴敏, 樊铮奕, 于涛, 等. 模块化人机协作机械臂控制系统设计研究[J]. 南方农机, 2025, 56(03): 51-53.
- [2] 陈丹惠, 张志华, 陈慧娟, 等. 模块化人机协作机械臂控制系统设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2023, (12): 178-181.
- [3] 崔方圆, 张解语, 高志强, 等. 搬运机械臂液压系统计算和元件选型研究[J]. 南方农机, 2023, 54(15): 30-33+39.
- [4] 张盛, 朱志豪. 面向模块化机械套件的伺服系统设计[J]. 新型工业化, 2022, 12(09): 64-67.
- [5] 李艳辉, 霍琦, 李昂, 等. 模块化超冗余度空间机械臂的设计与实验[J]. 机器人, 2022, 44(01): 55-65.