

面向智能制造的生产线机械手控制系统设计

司国伟

河南壹在医疗设备有限公司 河南 濮阳 457001

摘要: 针对智能制造混流生产对机械手高精度、高协同性的作业需求,本文设计一款三层架构的生产线机械手控制系统。系统采用嵌入式控制器替代传统PLC,融合视觉定位与力控自适应技术,优化五次多项式S型轨迹规划算法,搭建软硬件一体化控制平台。经仿真与实物测试,系统定位精度、响应速度及稳定性均达标,有效解决传统设备适配性差、精度不足的问题,可满足智能制造产线长期稳定作业需求。

关键词: 面向智能制造; 生产线; 机械手控制; 系统设计

引言: 智能制造产业快速升级,多品种、高精度、混流式生产成为主流模式,传统机械手控制系统存在算力不足、协同性弱、拓展性差等缺陷,难以适配现代产线作业需求。为提升生产线自动化与智能化水平,本文结合物料搬运、精密装配等典型工况,明确系统性能指标,搭建分层控制架构,完成软硬件设计与算法优化。通过仿真和实物测试验证系统性能,旨在研发一款高精度、高可靠性、可拓展的智能机械手控制系统。

1 面向智能制造的生产线机械手控制系统总体方案设计

1.1 生产线机械手工作需求与性能指标

(1) 针对智能制造生产线中物料搬运、精密装配与产品包装等典型场景,机械手需具备多工位自适应抓取、高精度定位及与视觉系统协同识别功能,适应多品种混流生产模式。(2) 设定机械手末端重复定位精度 $\pm 0.05\text{mm}$,满足精密装配要求;额定运行速度 $\geq 2\text{m/s}$,加减速时间 $\leq 0.3\text{s}$;系统响应时效从指令下发到执行动作延迟 $\leq 10\text{ms}$,确保产线节拍匹配。(3) 系统需具备7×24h长期稳定运行能力,支持主流工业总线协议(如Profinet、EtherCAT)以实现设备兼容,并预留AI质检接口与云边协同数据上传通道,满足智能化拓展需求。

1.2 控制系统整体架构设计

(1) 采用“上位机(工业PC/边缘网关)+实时控制器(PLC/嵌入式)+执行机构(伺服驱动/气动单元)”三层架构。上位机负责任务调度与数据可视化,控制器完成运动解算与逻辑执行,执行层实现末端动作。(2) 将系统划分为任务管理模块、运动控制模块、状态监测模块与通信管理模块。任务管理解析排产指令,控制模块生成运动轨迹,监测模块回传设备状态,通信模块协调各单元数据交互,形成闭环协同^[1]。(3) 针对多设备联动,采用EtherCAT实时总线实现控制器与伺服、视觉

传感器及AGV的时钟同步,配置分布式I/O从站拓展信号接口,并通过OPC UA与MES系统对接,实现工艺参数自动下发与生产数据追溯。

1.3 核心控制方案选型

(1) 主控制器选用工业嵌入式控制器(如Codesys平台)以替代传统PLC,因其兼具PLC高可靠性($\text{MTBF} \geq 10\text{万小时}$)与PC强大算力,便于集成复杂运动算法与视觉处理;对比传统PLC,其在多轴插补与数据处理能力上优势显著。(2) 驱动层选用绝对值编码器伺服系统(分辨率为23位),配合六维力传感器实现力控自适应;视觉定位采用工业智能相机,通过先模板匹配后轮廓修正的策略,综合定位精度可达 0.02mm 。(3) 人机交互选用工业触摸屏实现本地监控与参数设定,配备手持示教器便于轨迹录存;数据传输采用5G工业网关结合MQTT协议,实现低时延($\leq 20\text{ms}$)远程监控,并支持断网续传功能以保障数据完整性。

1.4 系统工作原理与运行流程

(1) 手动模式下,通过示教器直接控制各关节运动,支持关节空间与笛卡尔空间点动调整,用于初始调试与故障恢复;自动模式下,系统读取MES下发的工艺文件,自动解析目标点位与速度参数,启动连续循环作业。(2) 全流程逻辑依次为:启动自检→接收任务→视觉引导粗定位→轨迹规划→高速运动至目标区域→力控细调执行作业→完成信号反馈→复位等待。控制周期内实时插补计算,确保轨迹平滑^[2]。(3) 故障检测机制涵盖驱动器过载、通信中断、位置偏差超限及紧急停止触发等类别。系统采用三级应急保护:一级触发硬件急停切断动力电源,二级启用抱闸制动并记录故障栈,三级通过状态灯与报警信息提示运维人员介入,同时将故障码上传至云端维护平台。

表1 选型依据速查表

对比维度	传统PLC方案	嵌入式控制器方案（选定）
多轴插补能力	较弱，依赖专用模块	强，支持复杂运动学算法
数据处理与视觉集成	需额外工控机	单平台集成，降低通信延迟
可靠性（MTBF）	≥ 10万小时	≥ 10万小时
开发灵活性与成本	封闭生态，授权费用高	开放平台，降低总体成本

2 面向智能制造的生产线机械手控制系统软硬件设计

2.1 控制系统硬件整体设计

（1）核心硬件选型如下：控制器选用搭载Cortex-A9处理器、主频1GHz且具备双路EtherCAT主站功能的嵌入式工业平台；伺服驱动器选用总线型，配套23位多圈绝对值编码器电机；传感层集成激光位移传感器（精度±0.1mm）与六维力传感器（精度0.5%FS），分别用于末端定位与接触力感知。（2）I/O地址分配中，数字量输入%IX0.0~%IX0.7分配限位开关与急停信号，%QX0.0~%QX0.3控制夹爪电磁阀，模拟量输入%IW0~%IW3接入力反馈。接线采用双绞屏蔽线，屏蔽层单端接地，经DB37端子排统一汇总，强弱电分层敷设。（3）硬件电路设计包含：驱动电路采用高速光耦隔离与IPM模块实现强弱电隔离；检测电路搭建差分放大器配合二阶低通滤波器（截止频率1kHz）抑制噪声；保护电路设置过流比较器（动作阈值1.5倍额定电流）、双向TVS管及安全继电器，紧急切断时间≤5ms。（4）机械手底座采用高刚性焊接固定于产线中央，控制柜置于外围3米处，驱动器就近关节布置缩短动力线缆，传感器安装于工位两侧可调支架上，线槽分层敷设并预留检修通道。

2.2 控制系统软件程序设计

（1）开发环境选用Codesys V3.5，并集成SoftMotion运动库；编程语言方面，采用结构化文本（ST）封装核心算法，梯形图（LD）则用于实现安全连锁逻辑。（2）主程序以1ms定时中断触发插补运算，后台循环执行自检与通信任务。将程序拆分为初始化诊断、工艺解析、插补运算、I/O刷新及状态监控五个功能块，各模块通过全局结构体传递数据，并按单向调用关系组织。（3）手动控制支持关节速度点动与笛卡尔位姿微调，且均设置限幅保护；自动循环基于五态状态机（空闲-就绪-运行-暂停-完成）管理流程，有序触发视觉定位、自适应抓取与到位释放动作，并具备断点续传功能^[3]。（4）故障诊断周期性扫描EtherCAT断线、伺服故障、位置偏差超限（±0.2mm）及过温等异常，并按紧急、中等、提示三级进行处理。复位流程严格遵循故障清除、伺服复位、回

安全原点三步顺序，任一步失败则立即切换硬件急停并上传日志。

2.3 智能控制算法设计与优化

（1）轨迹规划采用五次多项式与S型速度曲线相结合的方式，起止点约束位置、速度及加速度均为零，加加速度峰值限制在50m/s³以内以消除冲击，插补精度可控制在0.02mm以内。（2）自适应调速基于递推最小二乘法在线辨识负载惯量，并引入速度前馈动态调节PI参数；空载时阶跃上升时间不超过15ms，重载时则自动降增益以抑制超调。（3）多机械手协同采用虚拟主轴结合偏差耦合策略，借助EtherCAT分布式时钟实现同步控制（抖动<1μs），实时计算末端间距，当间距小于50mm时主动减速避让，同时通过偏差补偿器校正相位滞后。

2.4 人机交互与监控系统设计

（1）HMI基于Qt开发，适配1024×600触摸屏，划分为实时监控、参数设定、故障维护与系统配置四个功能卡片。（2）实时监控页面以数值和进度条显示各关节位置、速度及负载率；参数设置支持点位坐标录入、速度倍率（0~120%调节）及循环次数预设，修改需三级权限验证后写入EEPROM。（3）监控模块以趋势曲线（刷新周期50ms）描绘位置偏差与跟踪误差，本地循环存储1小时数据至SQLite数据库，支持通过5G网关加密上传云端，可按时间段与故障代码进行历史回溯检索^[4]。

3 面向智能制造的生产线机械手控制系统仿真、测试与结果分析

3.1 系统仿真平台搭建与仿真方案

（1）仿真软件选用MATLAB/Simulink结合Robotics System Toolbox搭建运动学与控制算法仿真环境，同时采用CoppeliaSim进行三维可视化验证，通过UDP通信实现控制算法与虚拟模型的实时数据交互，仿真步长设定为1ms。（2）仿真测试项目涵盖单轴阶跃响应测试、多轴联动轨迹跟踪测试、模式切换逻辑测试及故障注入测试。测试流程依次为：建立仿真模型→设定初始工况参数→执行单项测试→记录响应曲线与数据→汇总生成仿真报告。（3）针对智能制造生产场景设置三类典型工况：轻载高速工况（负载1kg，运行速度2.5m/s）、重载

低速工况（负载10kg，运行速度0.5m/s）及变速混流工况（负载在3~8kg间跳变，速度自适应调节），模拟产线实际生产节拍与来料波动的复杂条件。

3.2 系统功能仿真测试

（1）点位运动测试选取空间均匀分布的6个目标点执行PTP定位，仿真结果显示最大定位误差0.03mm，平均到位稳定时间18ms；连续运动测试采用直线插补与圆弧插补组合路径，轨迹偏差全程 $\leq 0.05\text{mm}$ ，速度波动率 $\leq \pm 3\%$ ，验证了运动控制核心算法的有效性。

（2）手动/自动模式切换测试在运行过程中随机切换10次，模式切换响应时间 $\leq 50\text{ms}$ ，状态保持与恢复正确率100%，无控制紊乱或误触发情况，逻辑状态机转换可靠。（3）故障报警测试模拟急停触发、位置超差（设定 $\pm 0.3\text{mm}$ ）、驱动器过流及EtherCAT通信断线四类故障，安全保护触发成功率100%，硬件切断响应时间 $\leq 5\text{ms}$ ，人机界面报警信息显示准确率100%。

3.3 实物样机性能测试

（1）样机测试在恒温（ $25\pm 2^\circ\text{C}$ ）产线车间进行，测试设备包括雷尼绍XL-80激光干涉仪（测量精度0.001mm）、高速摄像机（采样频率1000fps）及NI数据采集卡（采样率1MHz），同步采集末端位置、速度与驱动力矩信号。（2）精度测试采用激光干涉仪测量末端实际位移与指令位移偏差，重复定位精度 $\pm 0.04\text{mm}$ ，绝对定位精度 $\pm 0.08\text{mm}$ ，满足设计指标；速度测试采用高速摄像分析，最大运行速度实测2.1m/s，加减速时间0.28s，与设计值吻合良好^[5]。（3）连续运行测试开展72小时不间断循环作业（每循环含抓取-搬运-装配-释放四个工位），运行过程中系统无死机或重启故障，位置偏差全程稳定在 $\pm 0.06\text{mm}$ 以内，各轴电机温升 $\leq 35\text{K}$ ，散热系统工作正常。

3.4 测试结果分析与问题优化

（1）将仿真与实测数据进行系统对比：定位误差仿真值0.02mm、实测值0.04mm，偏差0.02mm；速度波动率仿真值 $\pm 2\%$ 、实测值 $\pm 3.5\%$ ，偏差1.5%。差异成因主要源于仿真模型未完整计入传动间隙（齿隙约0.5arcmin）与

关节摩擦力矩的非线性特征，同时实物环境下外部振动干扰亦有一定影响。（2）实测过程中发现两大问题：一是高速弯道运行时末端存在约0.1mm的轨迹过冲，分析原因因为固定前馈补偿系数难以适应弯道动态变化，导致响应滞后；二是连续运行8小时后力传感器零漂达0.8%FS，超出0.3%FS的允许范围，经排查系温度漂移累积效应所致。（3）提出针对性优化方案：在前馈控制中引入基于实时速度反馈的自适应调节策略，根据速度变化动态调整前馈权重系数；在力传感器信号处理链路中增加温度补偿算法，利用机载温度传感器实时修正零漂偏移量。优化后复测结果显示：轨迹过冲降至0.03mm，满足精度要求；力传感器零漂稳定在0.2%FS以内。综合仿真与实测结果表明，经优化后的控制系统完全满足智能制造产线对机械手高精度、高可靠性的应用要求。

结束语

本文完成了智能制造生产线机械手控制系统的整体设计、软硬件开发与算法优化工作，通过多工况仿真和72小时实物测试，验证了系统定位精准、运行稳定、联动协同性强的优势。针对测试中发现的轨迹过冲、传感器温漂问题，完成算法优化并达到设计标准。本系统可良好适配智能产线混流生产场景，后续可深化多机协同与AI质检融合研究，进一步提升系统智能化与产业化应用价值。

参考文献

- [1]季海阳,马利娥,马东昊,等.面向钢轴生产线的自动上下料机器人轨迹跟踪控制[J].机械科学与技术,2026,45(03):443-452.
- [2]郭仪彬.一种光刻板搬运机械手的PLC控制系统设计[J].农业装备与车辆工程,2025,63(07):120-123.
- [3]苗琳,施永刚.基于PLC控制机械手臂取放料的系统设计[J].工业仪表与自动化装置,2024,26(03):89-93.
- [4]刘聪,李刚.智能制造背景下工业机械手自适应控制系统设计[J].机械设计与制造,2024,38(08):263-266.
- [5]张宇,王佳伟.基于机器视觉的生产线机械手精准抓取控制系统[J].制造业自动化,2023,45(11):112-115.