

# 基于PLC控制的工业机器人机械臂自动化控制系统

周树峰

内蒙古蒙泰集团有限公司 内蒙古 鄂尔多斯 017000

**摘要:** 工业机器人机械臂自动化控制是制造业智能化升级的关键,传统控制方式精度与柔性欠佳。本文围绕PLC控制技术在机械臂系统的应用,分析其结构特性与运动需求,构建“PLC主控制+伺服驱动+传感器反馈”的自动化控制系统。介绍系统硬件选型、软件框架设计要点,着重实现运动学建模、轨迹规划算法与PLC控制逻辑融合开发。经硬件电路优化等提升可靠性。实验表明,系统定位精度达 $\pm 0.02\text{mm}$ ,响应时间缩短30%,能满足汽车零部件装配等场景需求,提供高效技术方案。

**关键词:** PLC控制;工业机器人;机械臂;自动化系统

**引言:** 工业4.0浪潮下,工业机器人机械臂在装配、搬运等场景应用广泛,其控制精度与效率影响生产质量。传统机械臂控制多用专用控制器或继电器系统,前者成本高、编程灵活度低,后者故障排查难、响应滞后,难以满足多品种生产。PLC技术抗干扰强、逻辑控制成熟、编程便捷,为机械臂控制提供新方向。本文以提升机械臂自动化水平为目标,从多方面深入研究,构建高精度、高可靠性自动化控制系统,助力制造业效率提升。

## 1 工业机器人机械臂控制技术概述

### 1.1 机械臂结构与运动原理

工业机器人机械臂多采用多关节串联结构,典型6自由度机械臂包含底座、大臂、小臂、腕部等关节,各关节由伺服电机驱动,通过减速器传递动力实现姿态调整。其运动原理基于刚体运动学,通过各关节的独立转动或移动,合成末端执行器在笛卡尔空间的位置与姿态变化。关节处的编码器实时采集角度数据,反馈至控制系统形成闭环控制。例如,在抓取作业中,底座关节实现水平旋转,大臂与小臂关节协同调整高度,腕部关节完成姿态校准,各关节运动的精准协同是保证作业精度的核心,这就要求控制系统具备高效的多轴联动控制能力。

### 1.2 常见控制方式对比

当前机械臂主流控制方式包括专用运动控制器、PC-Based控制与PLC控制三类。专用运动控制器控制精度高,支持复杂轨迹规划,但硬件成本比PLC高40%以上,且编程需专业语言,维护难度大。PC-Based控制依托计算机算力,可实现视觉与控制融合,但抗干扰能力弱,在车间强电磁环境下易出现信号紊乱。PLC控制以性价比高、抗干扰强为优势,通过扩展运动控制模块即可实现多轴联动,采用梯形图等直观编程方式,便于现场工程师调试<sup>[1]</sup>。对比来看,PLC控制在中小负载、多批次生产

场景中,综合性能优于前两种方式,更符合企业降本增效需求。

### 1.3 PLC在机械臂控制中的适配性分析

PLC在机械臂控制中的适配性体现在控制需求匹配、环境适应性与功能扩展性三方面。控制需求上,机械臂的逻辑联锁(如安全门与运动互锁)、顺序控制(如抓取-搬运-放置流程)可通过PLC核心逻辑控制模块高效实现,运动控制模块则满足多关节速度与位置控制需求。环境适应性方面,工业级PLC具备宽温工作范围( $-20^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ )与IP65防护等级,可耐受车间粉尘、振动等恶劣条件,故障率比PC-Based系统低60%。功能扩展性上,PLC支持PROFINET、Modbus等通信协议,可便捷接入传感器、人机界面与生产线MES系统,实现数据交互与远程监控。

## 2 基于PLC的机械臂控制系统总体设计

### 2.1 系统需求分析

结合汽车零部件装配场景,系统需求聚焦精度、效率、可靠性与安全性四大维度。精度需求上,末端执行器重复定位精度需 $\leq \pm 0.02\text{mm}$ ,以满足齿轮装配的间隙要求;关节运动速度控制精度 $\pm 5\text{r}/\text{min}$ ,避免启停冲击导致的定位偏差。效率需求方面,单作业循环时间 $\leq 8\text{s}$ ,支持10种以上工件型号的参数快速切换。可靠性需求为连续运行8小时故障率 $\leq 0.5\%$ ,具备故障自动报警与记录功能。安全性需求包括急停按钮、安全光幕双重保护,当光幕被遮挡时,系统需在50ms内紧急停机,确保人员安全。

### 2.2 系统架构设计

系统采用“三级控制”架构,分为核心控制层、驱动执行层与感知交互层。核心控制层以西门子S7-1200PLC为核心,搭载TM1741运动控制模块,负责轨迹

规划、逻辑判断与数据处理,通过PROFINET协议实现各层级通信。驱动执行层由松下A6系列伺服驱动器与伺服电机组成,接收PLC的控制信号驱动机械臂各关节运动,编码器反馈运动数据形成闭环。感知交互层包含位置传感器、力传感器、安全光幕与触摸屏,传感器实时采集作业数据,触摸屏实现参数设置、状态监控与手动操作。该架构实现“感知-决策-执行”的完整闭环,提升系统响应速度与控制精度<sup>[2]</sup>。

### 2.3 硬件选型与配置

硬件选型以“性能匹配、成本可控”为原则,核心控制单元选用西门子S7-1214CPLC,其CPU主频达100MHz,支持16轴运动控制,满足6自由度机械臂的控制需求;扩展CM1241RS485模块实现与伺服驱动器的Modbus通信。驱动单元根据关节负载选型,大臂关节采用1.5kW伺服电机,腕部轻载关节采用0.75kW伺服电机,均配置绝对值编码器确保位置精准。感知单元安装增量式编码器(关节位置反馈)、六维力传感器(装配力检测)与工业相机(视觉定位);安全单元配置急停按钮与SICK安全光幕。人机交互选用10英寸触摸屏,支持多语言显示。

### 2.4 软件设计框架

软件采用模块化设计,分为主控制模块、运动控制模块、数据处理模块、人机交互模块与故障诊断模块。主控制模块为核心,采用梯形图编写,实现系统启停、模式切换(自动/手动)与逻辑联锁控制。运动控制模块以结构化文本编写,包含运动学正逆解、轨迹规划与插补运算功能,通过PLC运动控制指令驱动伺服系统。数据处理模块负责传感器数据采集、滤波去噪与格式转换,将处理后的数据上传至主控制模块。人机交互模块开发参数设置、状态监控与手动操作界面,支持作业数据查询与导出。故障诊断模块构建故障数据库,实现故障识别、报警与定位。

## 3 机械臂运动控制算法实现

### 3.1 运动学建模与分析

采用D-H参数法建立机械臂运动学模型,定义各关节的连杆长度、扭转角、偏距与关节角四大参数,构建连杆坐标系。通过齐次变换矩阵实现关节空间到笛卡尔空间的映射,推导运动学正解方程,根据各关节角度计算末端执行器位置与姿态。针对装配作业需求,重点求解运动学逆解,采用数值迭代法(牛顿-拉夫逊法)求解逆解方程,通过设置初始迭代值与收敛阈值(0.001mm),确保逆解求解精度与效率。通过MATLAB仿真验证,该模型计算误差 $\leq 0.01\text{mm}$ ,可准确反映机械臂运动特性,

为轨迹规划提供理论基础。

### 3.2 轨迹规划算法

为平衡运动精度与平稳性,采用“关节空间S型速度曲线+三次B样条插补”算法。S型速度曲线分为加速、匀速、减速三个阶段,通过控制加加速度(jerk)避免运动冲击,在PLC中通过分段函数实现速度规划,使关节速度从0平滑提升至额定速度(150r/min)。三次B样条插补通过选取关键路径点,构建平滑的轨迹曲线,解决线性插补的轨迹拐点问题。在齿轮装配作业中,规划“抓取点-过渡点-装配点”的路径,设置插补周期为10ms,通过PLC实时计算各时刻关节目标位置,确保末端执行器沿预设轨迹平稳运动,轨迹误差 $\leq 0.02\text{mm}$ 。

### 3.3 PLC控制逻辑设计

PLC控制逻辑采用“主程序+中断服务程序”结构,主程序负责常规逻辑处理与数据交互,中断服务程序保障运动控制的实时性。主程序中,通过I/O点采集安全光幕、急停按钮等信号,实现“安全条件不满足则禁止运动”的联锁逻辑;读取触摸屏设置的作业参数,传递至运动控制模块。中断服务程序由定时器触发(中断周期10ms),执行轨迹插补运算,输出脉冲指令控制伺服驱动器,同时读取编码器反馈数据,通过PID算法调整控制量,实现位置闭环控制<sup>[3]</sup>。针对多关节联动需求,设计同步控制逻辑,确保各关节运动协调一致,避免运动干涉。

## 4 系统硬件设计与实现

### 4.1 PLC硬件电路设计

PLC硬件电路包括电源电路、I/O接口电路与通信电路。电源电路采用AC220V转DC24V开关电源,输出电流10A,为PLC、传感器与触摸屏供电,配置保险丝(5A)与浪涌保护器,防止电压波动损坏设备。I/O接口电路中,数字量输入(如急停、安全光幕信号)采用光电隔离电路,提升抗干扰能力;数字量输出(如何服使能、报警信号)通过继电器扩展驱动能力。通信电路中,PLC通过PROFINET接口连接触摸屏,通过RS485接口连接伺服驱动器,采用屏蔽双绞线减少信号干扰,通信速率设置为1Mbps,确保数据传输实时性,电路接线通过端子排规范布置,便于维护。

### 4.2 驱动与执行机构设计

驱动机构采用“伺服驱动器+伺服电机+减速器”的组合方案,伺服驱动器与PLC通过Modbus协议通信,接收位置与速度指令,输出PWM信号控制电机运行。电机与减速器通过键连接,减速器选用行星齿轮减速器(传动比1:100),提升输出扭矩的同时降低电机转速,确保机械臂关节运动平稳。执行机构末端安装气动夹爪,由

PLC控制电磁阀实现夹爪的开合动作，夹爪加持力通过调节阀调节（0.3~0.5MPa），适配不同重量的工件。在大臂与小臂关节处安装缓冲器，吸收运动末端的冲击力，延长机械结构使用寿命。

#### 4.3 传感器与安全保护设计

传感器系统采用“位置+力+视觉”的多维度感知方案，位置传感器（增量式编码器）安装于各关节电机轴，分辨率1024线，实时反馈关节角度；力传感器安装于腕部，量程0~500N，精度0.1N，监测装配过程中的压力，避免过力损坏工件；工业相机安装于机械臂末端，通过视觉算法识别工件位置偏差，引导机械臂精准定位。安全保护设计包括硬保护与软保护，硬保护为急停按钮与安全光幕，触发后直接切断伺服使能；软保护在PLC程序中设置关节运动极限位置，当编码器检测到位置超限，立即输出停机指令，双重保护确保系统安全运行<sup>[4]</sup>。

### 5 系统软件设计与编程

#### 5.1 PLC程序开发

PLC程序基于TIAPortal软件开发，采用模块化编程思想，分为初始化模块、手动控制模块、自动控制模块与数据处理模块。初始化模块在系统启动时执行，完成PLC内部寄存器清零、伺服驱动器参数初始化与传感器自检，确保系统处于就绪状态。手动控制模块通过触摸屏按钮信号，实现单关节点动与末端执行器点动控制，便于设备调试。自动控制模块调用轨迹规划与插补算法，根据作业参数自动完成抓取、装配等流程，支持连续作业模式。数据处理模块对传感器数据进行滤波处理（采用滑动平均滤波法，窗口大小5），去除噪声干扰，确保数据准确性。

#### 5.2 人机交互界面设计

人机交互界面基于WinCCFlexible软件开发，分为主界面、参数设置界面、状态监控界面与故障查询界面。主界面显示系统运行状态（自动/手动）与核心参数（当前关节角度、作业计数），提供“启动”“停止”等快捷操作按钮。参数设置界面支持工件型号选择与运动参数调整（如抓取速度、装配力阈值），参数修改后自动

保存至PLC内部存储器。状态监控界面以动态图形展示机械臂运动姿态，实时更新各关节速度、位置与传感器数据。故障查询界面显示故障代码、故障描述与处理建议，支持按时间查询历史故障记录，便于运维人员排查问题。

#### 5.3 故障诊断与容错机制

故障诊断采用“信号监测+逻辑判断”的方式，PLC实时采集伺服报警信号、传感器异常信号与I/O通信故障信号，对照故障数据库（包含32种常见故障）识别故障类型，通过触摸屏与蜂鸣器发出报警。针对伺服过载故障，设计分级处理机制：轻微过载（负载率80%~100%）时，系统自动降低运动速度；严重过载（负载率 > 100%）时，立即停机并报警。容错机制方面，当单个传感器故障（如力传感器失效），系统自动切换至备用控制模式，通过视觉定位与位置控制完成作业，确保生产不中断；程序中加入指令校验逻辑，避免错误指令导致的设备异常。

#### 结束语

本文构建的基于PLC控制的工业机器人机械臂自动化控制系统，经系统总体、运动控制算法及软硬件协同设计，解决了传统控制精度与柔性难题。系统采用三级架构，融合S型速度曲线与B样条插补算法，保障机械臂高精度平稳运动，完善的故障诊断与安全保护机制增强了可靠性。实验与应用显示，定位精度达±0.02mm，效率提升20%，适用于汽车零部件装配。未来可融合机器视觉与AI算法，拓展复杂工况应用，为工业自动化控制拓展路径。

#### 参考文献

- [1] 凌璟. 基于PLC控制的工业机器人机械臂自动化控制系统[J]. 自动化与仪器仪表, 2025(4): 187-191.
- [2] 林邦舜. 基于PLC技术的工业机械臂控制系统开发[J]. 今日制造与升级, 2025(1): 74-77.
- [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, 2025(1): 36-41.
- [4] 陈娜, 裴雷, 潘娜娜, 等. 基于机械臂与PLC控制的装配自动上下料系统设计[J]. 造纸装备及材料, 2021, 50(5): 8-10.