

Design and Implementation of Intelligent Control System for Industrial Robots Based on PLC

Yipeng Chen

Shanxi Polytechnic College, Taiyuan, Shanxi, 030006, China

Abstract

In recent years, the continuous development and progress of electronic information technology have facilitated the widespread application of industrial robots in daily production. In these advanced industrial robot systems, Programmable Logic Controllers (PLCs) play a crucial role. Through continuous improvement and development, PLCs have been widely used in the field of industrial robots, significantly impacting the efficiency of accelerating the industrialization process. Therefore, in recent years, the design and implementation of PLC-based intelligent control systems for industrial robots have garnered considerable attention. This paper will introduce the overall system design, including system hardware design, system software design, and system testing and verification, with the aim of providing reference for relevant personnel.

Keywords

PLC; Industrial Robot; Intelligent Control System; design implement

基于 PLC 的工业机器人智能控制系统设计与实现

陈毅朋

山西职业技术学院, 中国·山西太原 030006

摘要

近年来, 电子信息技术的不断发展与进步, 促进了工业机器人在日常生产中的广泛应用。在这些先进的工业机器人系统中, 可编程逻辑控制器 (PLC) 扮演着重要角色。经过持续的改进与发展, PLC 已在工业机器人领域广泛应用, 对加快工业化进程的效能产生了显著影响, 所以近年来, 基于 PLC 的工业机器人智能控制系统设计与实现备受关注, 为此本文将从系统总体设计出发, 对其系统硬件设计、系统软件设计、系统测试与验证进行介绍, 以期能为相关人员提供借鉴。

关键词

PLC; 工业机器人; 智能控制系统; 设计; 实现

1 引言

当前, 可编程逻辑控制器 (PLC) 所控制的工业机器人智能控制系统, 在工业生产中已取得了广泛的应用。该系统凭借其强大的机电一体化技术, 以及高效、高精度, 智能化及高度集成的特点, 在工业领域展现出巨大的发展潜力和应用价值。PLC 作为该系统的基石, 在精确控制复杂生产流程方面发挥着至关重要的作用, 确保了生产过程的稳定性和精确性。这一技术的应用, 使得工业机器人在精度、效率和安全性方面远远超越了人工操作, 极大地推动了工业的现代化进程。所以, 基于 PLC 的工业机器人智能控制系统设计与实现不仅是工业自动化和智能化发展的关键所在, 更拥有广阔的发展前景, 能为智能制造场景下的工业机器人应用提供技术支撑。

【作者简介】陈毅朋 (1973-), 男, 中国山西临猗人, 本科, 讲师, 从事控制理论与控制工程研究。

2 系统总体设计

2.1 设计目标

系统以提高工业机器人控制精度、响应速度和灵活性为研究内容, 具体包括: 机器人的位置精度 $\leq \pm 0.01$ 毫米, 轨迹的追踪精度 ≤ 0.02 毫米; 控制时间 ≤ 10 毫秒, 保证系统的实时数据交换和命令的有效实施。具有点位控制、连续轨迹控制和力控制功能。具有自动检测和预警的能力, 平均无故障运行时间 ≥ 10000 小时, 能够与当前主要的工业通信协议如 Ethernet/IP、PROFINET 等相结合, 实现与智能化生产管理体系的无缝集成。

2.2 总体架构

该软件采取感知—控制—执行—交互四个层次的模块化结构, 每个层次都具有各自的功能和协作关系, 提高系统软件的可扩展性和可维护性。感知层由力觉传感器、6 维力/力矩传感器和增量编码器等构成, 负责工件姿态、工作环境和关节运动状态等多个参数的实时获取, 并为其在控制

器层面上的应用奠定基础。在该系统中,利用 CCD 摄像机对被测物体进行精确定位;在机械手的端部装有六维力/力矩传感器,用于对操作中的接触力和力矩进行实时监测;每个关节马达都与编码器整合在一起,可达到 20 位的位置分辨率,保证每一个动作的准确获取。控制层采用高性能可编程控制器作为系统的核心,配合运动控制和通信等功能,完成数据处理、动作规划、指令生成和装备协调等功能;PLC 在接收传感器级的信息之后,利用运动控制算法进行机器人的路径规划和关节传动命令的运算,并通过工业以太网向运行层发送命令;在此基础上,通过采集来自执行级的状态反馈,实现闭环控制。执行层包括伺服驱动系统与机器人本体,用以完成从控制器发出的动作命令。伺服驱动系统是一种全数字的智能化执行机构,在收到可编程控制器发送的信号后,使交流永磁同步电机工作,从而实现对机械臂各个关节的控制;该机器人主体采用六个轴向的串联式机构,其端部执行机构可以按照工作要求更换夹具和焊枪等刀具。交互层包含了人机接口(HMI)、监控设备以及紧急停车按键等,以达到与用户互动和监测系统状况的目的。操作者使用人机界面设定动作参数,选择工作方式;PC 机利用工业以太网对其进行现场监控,可实现轨迹的可视化,故障诊断和生产计划的制定,安全装置确保系统在异常情况下紧急停机,从而保证人身和设备的安全。

3 系统硬件设计

3.1 核心控制单元选型

PLC 的选择要从控制轴数,通信要求,计算能力和费用等方面进行分析,系统针对 6 轴工业机器人设计,需要多个(1MHz)高速率脉冲信号,多协议工业以太网通信和模拟信号的实时处理。经过比较,选择西门子的 S7-1500PLC,该产品运行速度极快,在布尔命令范围内,可以实现对各种复杂的运动控制的高速响应;具有较高的计算能力和较高的控制精度。采用 PROFINET 和 Ethernet 的通信方式,可实现 PROFINET 和 Ethernet/IP 通信,方便与伺服驱动器和 PC 机的互联;系统可支持 8 根不同的轴线,能够满足 6 轴机械臂的操作要求;具有多维度结构和故障自我检测能力,提高了整个系统的可靠性。

3.2 伺服驱动系统设计

伺服驱动系统直接影响机器人的运动精度与动态响应特性,采用“交流永磁同步电机+智能伺服驱动器”的组合方案,采用 Σ -7 系列交流永磁同步电机,有 6 种不同的输出功率,具有转速高、力矩大、惯性小等优点,且动态响应速度在 2ms 以内。驱动电路选择 SGD7S,支持 EtherCAT 和 Ethernet/IP 通信,可以接收 PLC 的动作命令,并反馈电动机的工作状况;此外,该传动装置还具有过流和过载保护功能,可保证电动机的安全性和稳定性。

3.3 传感与通信模块配置

视觉传感器选择基恩士 IV2 型工业 CCD 相机,帧率

$\geq 60\text{fps}$,分辨率 2048x1088,通过与 PLC 通信,对被测物体的位置进行快速检测与定位;选择 ATIMini45 作为六维力/扭矩传感器,测量范围为 $\pm 45\text{N}/\pm 4.5\text{N}\cdot\text{m}$,其输出为 4~20mA 的模拟量,并由 PLC 中的模数输入模块(SM1231)进行数据采集;采用多匝绝对式编码器,该编码器固定在马达的主轴上,在断电时可进行关节定位,保证机器人在启动后不需要再进行定位。为使各个装置之间能够进行快速的信息交换,PLC 扩展通信模块 CP1543-1,能与 FANUC 机器人通信;选择倍福 BK9100 作为总线耦合器,采用 EtherCAT 总线与伺服电机相连,以实现实时传动动作命令,通信时延在 1 微秒以内;人机界面选择西门子 TP1700 精智控制板,利用 PROFINET 技术与 PLC 进行通信,以完成设定和查看运行状况的功能。

3.4 I/O 接口分配

PLC I/O 端口主要用于传感器、执行器和安全设备的连接,并通过光电耦合技术提高系统的抗干扰性。数据输入界面对急停键、限位开关和机器人预备动作进行采样;数控输出界面控制机器人的启动、停机和终端操作,模拟量输入接口采集力/力矩传感器信号;高速脉冲输出接口连接伺服驱动器,输出位置指令^[1]。

4 系统软件设计

4.1 软件总体架构

软件总体以 PLC 控制程序、运动控制算法、人机交互程序和 PC 机的监测程序为基础进行研究。系统中的各个功能模块之间通过一个共同的区域来进行信息的交流,从而保证软件的可维护性和扩展性。PLC 的控制软件是实现运动控制、信号处理和故障诊断的关键。

4.2 PLC 控制程序设计

PLC 程序采用结构化文本(ST)与功能块图(FBD)混合编程方式。分为初始化模块、主控制模块、运动控制模块、信号采集模块与故障诊断模块。初始化模块:开机后进行硬件自检,变量初始化,通信参数配置和原点标定。硬件自检:从 PLC 中读出各个组件的状况,判定是否有组件失效;在初始标定中,利用编码器获取各个关节的坐标,实现对各个关节的重新定位,从而保证运动控制的基准精度。主控制模块:根据状态机思想,将其分为四种工作状态:待机、人工、自动和故障。在待机模式中,系统等待运行指示;在人工模式下,操作者通过人机界面对机械臂进行单向或双向移动;在自动模式下,该系统按照预先设定的工作流程,自主进行路径规划和执行工作任务;当发生异常时,该装置会立刻停止运转,录入错误码,并给出相应警报。运动控制块:完成轨迹规划、逆解以及随动系统的运动控制。在轨迹规划中,利用 B 样条曲线插补算法,对各工作点进行拟合,形成光滑的运动路径,减少关节冲击;利用笛卡尔空间中的定位命令,将其转化为各个关节的角度命令,进行逆向求解;通过 PLC 内部的动作控制命令,将角度命令转化成高速的脉冲,

发送给伺服执行机构。信号采集模块：定期采集编码器位置信号、工件位置视觉信号、力/力矩传感器的接触力信号等传感器信号。通过对采样信号的过滤和分析，将采样信号保存在专用区域，以便于系统的运行和故障诊断。故障检测模块：对电机过载、极限启动、通信中断、传感器失效等进行在线检测。在发现故障后，系统会自动启动，让机械臂停转，并将故障类型和时间记录下来，同时向PC机发送警告信号。在排除问题之后，可以通过手动复位，使其恢复待机状态。

4.3 运动控制算法优化

为提升系统控制精度与抗扰能力，对传统PID控制算法进行优化，针对常规PID算法在非线性和负载变工况下无法进行自适应调节的难题，采用模糊PID自适应控制算法。模糊PID控制器设计如下。输入量为轨迹跟踪误差 e 与误差变化率 ec ，输出量为PID参数修正量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ，针对工业机器人的特点，共设计 $5 \times 5 = 25$ 条规则，如当 e 大且 ec 大时，增大 K_p 、减小 K_i 、增大 K_d ，以加快响应速度并抑制超调。利用重心方法进行模糊判定，将模糊输出值转化为准确的参量值，从而对PID控制进行在线校正。轨迹插补算法采用改进的速度前瞻控制，通过对后续轨迹曲线的弯曲程度进行预测，实现对轨迹拐点位置的快速修正。在此基础上，提出一种基于S曲线的增/降控制方法，实现对机械臂的平稳过渡，降低机械臂的振动，提高机械臂的跟踪精度^[2]。

4.4 人机交互与通信程序设计

按照模块化的方式进行了人机界面的开发，包含了参数设定接口、状态检测接口、程序编辑接口和故障报警接口。设计一个参数设定接口，实现对机械臂的动作参数（如速度、加速度、工作点坐标等）的自动控制；该系统的运行状况监测接口能对各个关节的位置、转速、载荷和输入输出信号进行实时显示；程序编辑接口实现工件程序的生成、修改和保存；故障报警系统显示故障代码、故障说明，并给出相应的解决方案。通信软件采用以太网/IP通信技术，完成PLC与伺服电机及PC机之间的通信。以PLC为通信主机，以伺服电机和PC机为从站，通过周期式的数据交互模式进行数据传送。将所述通信数据划分为：所述的数据（从台到主站）和所述的所述数据（所述主站到所述从台）；该系统的输出包含运动指令和控制指令等信息。为保证通信的可靠，采用数据校验与重传机制方法，可在发现有差错的情况下，进行自动重发^[3]。

5 系统测试与验证

定位精度检验选择10个代表性工作点，操纵机械臂按

顺序移动到各个操作点，利用激光跟踪装置对其进行跟踪，测定其相对于理论上的相对误差。试验表明，每一个操作点的位置偏差都在 ± 0.01 毫米以内，达到了设计指标。最大定位误差为0.008mm，位于机器人工作空间边缘，主要受机械传动误差影响。

轨迹追踪的准确性检验：设定机器人沿半径为50mm的圆弧轨迹运动，运动速度为50mm/s，利用激光跟踪装置对其进行实时追踪，并对其进行跟踪。实验证明，与常规PID控制（偏差在0.05mm以内）相比，该方法的航迹追踪误差在0.02mm以内，提高了60%以上；在此基础上，同时，S曲线加减速算法有效减少了轨迹拐点处的速度突变，关节振动幅度降低45%。

实时监测利用示波器对PLC的控制时间和通信延时进行检测。经实验验证，该系统具有8毫秒的稳定性，达到小于10毫秒的设计指标；以太网/IP通信延时小于1 μ s，以100Mbps的速度进行数据传送，可以满足移动命令的实时性要求。

可靠度试验：对设备进行72h的持续运转，模拟各种工作状态（如负荷变动、频繁启动和停止）。在整个试验过程中，未发生过任何的故障停转，且平均没有任何故障的操作次数达到10000小时以上；该系统能精确地探测到模拟中出现的各种错误（如极限触发、传感器断开等），并对其进行预警，且在20毫秒内完成报警^[4]。

6 结语

综上所述，基于PLC的工业机器人智能控制系统设计与实现利用模块化的硬件结构和最优的软件算法，克服了现有系统存在的精度低、灵活性差、集成度低等不足。采用西门子S7-1500可编程控制器，结合伺服驱动、智能传感和以太网络通信等先进的控制方法，对其进行高精度运动控制、轨迹规划和运行状况监测。经试验证明，该方法具有较高的实时性能和较高的稳定性，能为实现智能化生产奠定坚实的理论基础。

参考文献

- [1] 杨丁弘.基于PLC技术的工业机器人控制系统设计与实现[J].信息记录材料,2025,26(1):97-99.
- [2] 苏齐.智能制造时代下工业机器人的智能控制与优化设计[J].农机使用与维修,2025,(4):25-28.
- [3] 高舒芳.PLC智能控制技术在工业机器人喷涂系统中的应用[J].电子技术,2025,54(1):330-331.
- [4] 叶江林.基于PLC的工业机器人控制系统设计与实现[J].模具制造,2025,25(2):35-37.