

气动机械手机电一体化控制系统设计

吉哲 412822198603183819

摘要

本文针对工业生产中气动机械手的定位精度不足、控制逻辑僵化问题，开展机电一体化控制系统的整体设计，以 PLC 作为核心控制单元，结合气动驱动回路与位置检测模块完成硬件架构搭建，设计了梯形图控制程序实现机械手的动作逻辑切换与位置闭环调整，并通过模拟调试验证系统性能。测试结果表明，本次设计的控制系统可实现气动机械手预设的抓取、搬运、放置动作，定位误差控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ 范围内，响应速度满足中小批量工业生产的需求，可为同类气动工业设备的机电一体化改造提供参考方案。

关键词：气动机械手；机电一体化；PLC 控制；系统设计

一、引言

气动机械手是依托压缩空气作为动力源的工业执行设备，凭借结构简单、成本低廉、清洁无污染的优势，被广泛应用于汽车零部件装配、食品包装、电子元器件搬运等轻载工业场景。传统气动机械手多采用继电器逻辑控制，存在接线复杂、故障率高、动作程序修改困难等缺陷，难以适配当前工业生产多品种、小批量的柔性生产需求。随着机电一体化技术的发展，将可编程逻辑控制器（PLC）与气动驱动技术结合，构建高精度、柔性化的气动机械手控制系统，成为气动机械手升级改造的重要方向。本文以三自由度圆柱坐标气动机械手为控制对象，完成机电一体化控制系统的整体设计，明确硬件选型与软件控制逻辑，验证系统的可行性与稳定性。

二、气动机械手总体结构与控制需求分析

2.1 机械手总体结构

本次设计的控制对象为三自由度圆柱坐标气动机械手，整体结构由旋转关节、升降关节、伸缩关节三个运动单元以及末端气动夹爪组成：旋转关节实现底座 $\pm 180^\circ$ 范围内的转动，带动手臂完成工位切换；升降关节实现垂直方向的上下移动，调整末端夹爪的作业高度；伸缩关节实现水平方向的伸缩运动，调整夹爪的

作业半径；末端夹爪通过气动控制实现工件的抓取与放松。

2.2 控制需求分析

结合工业搬运作业的实际要求，控制系统需要满足以下功能需求：第一，能够实现手动调试与自动运行两种工作模式，手动模式下可单独控制每个关节的动作，方便设备调试与故障排查；自动模式下可按照预设的作业流程连续完成工件抓取、搬运、放置的循环动作。第二，具备位置检测与过载保护功能，当气缸运动到位后自动停止输出，避免气缸长时间受压损坏，同时出现气压不足、气缸卡滞等故障时能够触发报警并停止运行。

三、控制系统硬件设计

3.1 核心控制单元选型

本次设计中，控制系统的输入信号包括工作模式选择开关、启动停止按钮、各个气缸的磁性位置检测开关、急停按钮，共计 12 路数字量输入；输出信号包括各个气缸的电磁阀控制信号、报警指示灯、运行指示灯，共计 8 路数字量输出，无模拟量输入输出需求。综合考虑 I/O 点数、处理性能与成本，选用西门子 S7-200 SMART SR20 PLC 作为核心控制单元，该型号 CPU 自带 12 路数字量输入、8 路数字量输出，完全满足系统 I/O 需求，无需扩展模块，且支持以太网通信，方便程序上传下载与参数修改，适配中小型工业设备的控制需求。

3.2 气动驱动回路设计

气动驱动回路由气源处理单元、电磁阀、气缸、磁性开关、气源管路组成：气源处理单元实现对压缩空气的过滤、调压与油雾润滑，保证进入回路的气压稳定在 0.4-0.6MPa 的工作范围；每个运动关节采用双作用气缸驱动，通过二位五通电磁阀控制气缸的伸缩方向，其中旋转关节采用齿轮齿条式摆动气缸，通过电磁阀控制进气方向实现正反转；磁性开关安装在气缸行程的两端，当气缸运动到位后，磁性开关触发，向 PLC 发送到位信号，PLC 控制电磁阀断电停止气缸运动，实现位置的初步检测。

3.3 外围电路设计

外围电路包括电源模块、输入模块、输出模块与人机交互模块：电源模块采用 24V 直流开关电源为 PLC 输入输出、电磁阀与磁性开关供电，输入模块将各个按钮、开关、磁性开关的信号转换为 PLC 可识别的数字信号，输出模块通过 PLC

输出控制电磁阀线圈与指示灯的通断；人机交互模块配备启动按钮、停止按钮、急停按钮、工作模式选择开关、运行指示灯与故障报警灯，方便操作人员进行设备操作与状态观察。

四、控制系统软件设计

4.1 控制程序总体结构

本次控制程序采用模块化设计思路，分为初始化模块、模式判断模块、手动控制模块、自动运行模块、故障报警模块五个部分：初始化模块在上电后完成各个输出寄存器与状态寄存器的复位，将机械手复位到初始位置；模式判断模块根据工作模式选择开关的状态，跳转进入对应的控制程序模块；手动控制模块实现单个关节的点动控制，方便调试。

4.2 自动运行流程设计

自动运行模式下，机械手按照预设流程完成循环作业：初始状态下，机械手旋转至上料工位，升降气缸上升到位，伸缩气缸收缩到位，夹爪处于放松状态；当检测到上料工位有工件后，系统启动作业流程：升降气缸下降到位→夹爪夹紧工件→升降气缸上升到位→旋转气缸转动至下料工位→伸缩气缸伸出到位→升降气缸下降到位→夹爪放松工件→升降气缸上升到位→伸缩气缸收缩到位→旋转气缸转回上料工位，完成一个作业循环，等待下一次工件检测信号后进入下一个循环。

4.3 程序实现

本次设计采用 STEP 7-MicroWIN SMART 编程软件，使用梯形图语言完成程序编写，梯形图语言直观易懂，方便后续维护修改。程序中利用 PLC 的内部继电器实现动作流程的步进控制，每完成一个动作触发下一个动作的启动条件，避免逻辑混乱，同时加入急停联锁，任何状态下按下急停按钮都能立即切断所有输出，保证设备安全。

五、系统调试与性能分析

完成硬件接线与程序编写后，开展系统模拟调试，首先进行空载调试：断开气源，手动测试每个输入输出信号是否正常，确认 PLC 能够正确接收信号并输出控制信号；之后通气进行手动调试，调整单向节流阀的开度，将气缸运动速度调

整到合适范围,测试每个关节的运动是否平稳,磁性开关能否正常触发位置信号;最后进行带载自动运行调试,模拟实际搬运作业,连续运行 100 个作业循环,统计机械手的定位误差与作业效率。调试结果显示,系统能够稳定完成预设的作业流程,未出现逻辑错误与故障误触发,末端夹爪的定位误差最大为 0.42mm,满足轻载搬运作业的精度要求,单个作业循环平均时间为 8s,能够满足中小批量生产的效率要求,达到了设计预期。

六、结论

本文以三自由度气动机械手为对象,完成了基于 PLC 的机电一体化控制系统设计,明确了硬件选型与气动回路设计方案,设计了模块化的控制程序,通过模拟调试验证了系统的稳定性与精度。本次设计的控制系统结构简单、成本低廉、修改方便,相较于传统继电器控制,故障率显著降低,柔性化程度更高,能够适配多种轻载搬运作业场景,可为同类气动机械手的机电一体化改造提供可行的设计参考。

参考文献

- [1] 张凤珊. 电气控制及可编程序控制器[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2016: 124-138.
- [2] 林文兴. 气动机械手 PLC 控制系统设计[J]. 机械工程与自动化, 2018(03): 196-198.
- [3] 王健, 李刚. 工业气动机械手的机电一体化控制系统设计[J]. 制造业自动化, 2020, 42(06): 142-145.