

自动化上下料机构设计与控制系统

王鹏鹏

洛阳栾川钼业集团股份有限公司冶炼分公司 河南 洛阳 471000

摘要：为解决工业生产中人工上下料作业效率低、定位精度差及安全风险高等突出问题，本文设计了一套模块化自动化上下料机构及其控制系统。机械系统采用三轴直线模组配合气动夹爪的方案，详细阐述了结构设计、关键零部件选型及力学性能校核过程。控制系统以西门子 S7-1200PLC 为核心，构建了三层控制架构，开发了模块化程序与多重安全联锁逻辑。通过仿真分析与样机实验验证，结果表明：设备定位精度与重复定位精度均达到设计指标，运行稳定、工况适配性强，可有效满足柔性制造场景下的自动化上下料作业需求。

关键词：自动化上下料；机构设计；控制系统；PLC；模块化

引言

在制造业智能化转型的大背景下，自动化生产已成为提升生产效率、保障产品质量的核心路径，而上下料作为生产流程的关键环节，其作业模式直接影响整条生产线的运行效能。当前，多数中小型企业及部分传统生产线仍依赖人工完成工件取放、转运等作业，不仅存在劳动强度大、作业效率低的问题，还易因人为操作失误导致工件定位偏差，影响加工精度，同时在高危、高速作业场景中，人工操作存在极大安全隐患。针对钼合金等特殊工件的上下料需求，现有自动化设备存在适配性差、结构复杂、维护成本高的短板，难以满足柔性生产的多样化要求。基于此，本文开展自动化上下料机构与控制系统的设计研究，结合模块化设计理念，优化机械结构与控制逻辑，兼顾定位精度、运行稳定性与多工况适配性，旨在替代人工操作，降低生产安全风险，提升生产线自动化水平，为冶金、机械加工等领域的自动化上下料作业提供可行的技术方案，助力制造业实现高效、安全、柔性化生产。

1 自动化上下料机构总体方案与结构设计

1.1 系统总体方案设计

(1) 整体结构组成。系统采用模块化设计思路，由机械执行机构、驱动单元、检测单元及控制单元四大模块构成。机械执行机构包含 X/Y/Z 三轴直线模组与末端气动夹爪；驱动单元由伺服电机与步进电机协同驱动；检测单元集成限位开关、光电传感器及压力传感器，实现位置与状态反馈；控制单元基于 PLC 进行逻辑调度与信号处理。(2) 作业流程规划。系统按“取料→送料→归位→复位”四阶段循环运行。取料阶段驱动夹爪移

动至料仓抓取工件；送料阶段经路径规划移至加工工位并精准放置；归位阶段夹爪退离至安全区域；复位阶段各轴返回原点，完成单次循环。(3) 多工况适配方案。通过调节夹持力、更换夹爪镶块及调整取放位置参数，可适配常规回转体、方形件等多种工件的上下料需求。程序内置多组工艺参数配方，支持快速切换，满足柔性生产要求。

1.2 核心机械结构设计

(1) 移动传动机构设计。X/Y/Z 轴均采用“伺服电机+滚珠丝杆+直线导轨”传动方案。依据负载质量、行程与速度要求，计算丝杆轴向载荷与扭矩，确定公称直径与导程；校核导轨额定动载荷与静载荷，确保其疲劳寿命满足设计指标。(2) 夹持执行机构设计。针对工件最大尺寸（直径范围 20~80mm）与重量（ $\leq 5\text{kg}$ ），设计平行气动夹爪结构。确定了夹爪手指长度、行程及所需夹持力，计算夹紧力矩并选配气缸缸径；钳口处设置 V 型定位槽与聚氨酯垫片，兼顾定位精度与防滑保护^[1]。(3) 机架支撑结构设计。采用焊接钢架底座与铝合金立柱组合结构，关键连接处增设加强筋以提高整体刚度。通过有限元模态分析优化机架截面形状，确保设备在高速运动下固有频率避开激振频率，保证运行稳定性。

1.3 关键零部件选型与校核

(1) 传动零部件选型。依据载荷谱选型滚珠丝杆（公称直径 20mm、导程 10mm）、直线导轨（宽度 15mm、精度 P 级）及角接触球轴承；通过额定动载荷验算丝杆寿命，满足连续运行 $\geq 20000\text{h}$ 要求。(2) 夹持部件强度校核。针对夹爪手指与连接块进行静力学分析，按极限夹持力工况加载，计算危险截面应力并引入

安全系数 (≥ 2.5)，校核结果满足屈服强度要求，确保作业过程结构可靠。(3) 整体结构轻量化与优化设计。对机架及移动部件进行拓扑优化，去除冗余材料；采用高强度铝合金替代部分钢材，实现整机减重 15%。优化后运动惯量降低，有效减少能耗与启停振动，提升了动态响应性能。

2 自动化上下料控制系统软硬件设计

2.1 控制系统总体架构设计

(1) 层级划分。采用三层架构设计：感知层由各类型传感器构成，负责采集位置、压力、工件状态等信号；控制层以 PLC 为核心，完成逻辑运算、运动控制与状态调度；执行层包含伺服驱动器、电磁阀等，驱动电机与气缸动作。层间通过 I/O 信号与总线通信实现数据交互，确保指令下发与状态反馈的实时性。(2) 核心控制方案。选用 PLC 为主控制器，配合运动控制模块实现多轴联动。PLC 负责逻辑调度与顺序控制，运动控制模块独立完成插补运算与位置闭环，实现夹爪在空间内的精准定位与轨迹平滑过渡，满足上下料节拍要求。(3) 控制逻辑与联动机制。基于有限状态机模型，定义待机、取料、送料、加工等待、归位、复位等状态。各状态间通过传感器信号触发切换，同时设置超时保护与异常跳转机制，确保设备在正常工况下顺序执行，在异常状态下快速响应，避免卡料或碰撞。

2.2 控制系统硬件选型与电路设计

(1) 控制器选型。选用西门子 S7-1200 系列 PLC，CPU 集成以太网通信口与高速脉冲输出口，满足多轴脉冲控制需求；扩展数字量 I/O 模块与模拟量输入模块，适配传感器信号采集与气缸阀组驱动。(2) 驱动器件选型。X/Y/Z 轴伺服电机依据负载惯量比与峰值扭矩选型，配套绝对值编码器实现掉电位置记忆；旋转台选用步进电机配合细分驱动器，满足角度定位精度要求；气动夹爪由二位五通电磁阀配合调速阀控制，实现夹持与松开动作的快速响应^[2]。(3) 检测传感器选型。选用电感式接近开关检测工件到位状态，漫反射光电传感器检测料仓空满，限位开关实现各轴原点与软限位保护，压力传感器实时监测气源压力，确保夹持力在安全范围内。(4) 电气回路设计与 I/O 端口分配。设计主回路与控制回路独立供电方案，主回路包含伺服驱动器、开关电源等；控制回路为 PLC 及传感器提供 DC24V 电源。编制 I/O 分配表，将各传感器输入与执行器输出按功能分组映射至 PLC 对应端口，编制接线端子图指导柜内布线，并设置中间继电器隔离强电干扰。

2.3 控制系统软件程序设计

(1) 编程平台与语言。采用 TIA Portal 作为编程平台，主程序使用梯形图语言实现逻辑控制，运动控制功能块采用结构化文本编写，便于参数在线调试与逻辑维护。(2) 主程序流程设计。主程序包含初始化、自动循环、手动调试三大模块。初始化模块执行系统自检与原点回归；自动循环模块按状态机顺序触发各子程序；手动调试模块允许各轴独立点动操作，方便设备维保与故障排查^[3]。(3) 子程序模块化设计。取料子程序驱动 Z 轴下降与夹爪闭合，并检测夹持到位信号；送料子程序按规划路径移动至加工位；复位子程序按安全顺序使各轴返回原点；故障报警子程序实时扫描各传感器异常信号，触发声光报警并记录故障代码，同时暂停当前循环等待人工干预。(4) 安全联锁程序设计。设置多重互锁逻辑：夹爪未夹紧时禁止 Z 轴上升；各轴运动过程中禁止操作夹爪；气源压力低于阈值时整机停机并报警。同时设置各轴软限位与硬限位双重保护，规避碰撞与过载风险。

2.4 人机交互与监控设计

(1) 触摸屏界面设计。选用 7 英寸 HMI 触摸屏，开发主监控界面实时显示设备当前运行状态、各轴精准位置与作业节拍计数；参数设置界面支持灵活修改取放位置、夹持延时等核心工艺参数；手动操作界面配备各轴点动按钮及夹爪开关按键，同时设置多级权限管理机制，有效防止非专业人员误操作引发设备故障或安全事故。(2) 数据采集与监控方案。PLC 通过稳定的以太网通信将设备实时运行数据上传至监控终端，采集内容全面覆盖各轴实时位置、运行速度、累计循环次数及各类报警记录等关键信息。系统支持运行数据本地存储与历史数据快速查询，便于技术人员追溯设备运行状态、开展故障根源分析，为设备日常维护、性能优化提供详实的数据支撑，进一步提升设备运维效率与可靠性。

3 系统仿真、调试与性能实验分析

3.1 机械结构仿真分析

(1) 静力学分析。基于 ANSYS Workbench 建立机架及移动轴有限元模型，按极限工况施加夹持力、惯性力及自重组合载荷，求解应力与变形云图。将最大等效应力与屈服强度对比，安全系数 ≥ 2.5 ；将最大变形量与导轨安装面精度要求对比，校核刚度是否满足形位公差。识别应力集中高风险区，为补强提供依据。(2) 动力学仿真。在 ADAMS 中建立多刚体动力学模型，定义运动规律与负载。仿真启停、加减速及匀速过程，评估位移

响应与速度波动；提取关键位置振动加速度频谱，分析共振风险；追踪协同运动轨迹偏差，验证末端定位精度是否达标。（3）结构优化迭代。针对应力集中区域增设加强筋、增加壁厚或优化传力路径；对干涉风险部位调整安装位置或增设避让槽。经多轮迭代，比较优化前后应力峰值与变形量，确认改进有效，使结构综合性能提升并满足运行稳定性要求。

3.2 控制系统仿真调试

（1）PLC 程序仿真调试。在 TIAPortal 仿真环境运行程序，用虚拟输入模拟传感器与行程信号，逐项测试主程序状态切换、子程序调用及状态机跳转，验证多轴联动时序与互锁保护，监测变量排查死循环与误跳转，确保各输入组合下正确响应^[4]。（2）电气回路调试。断电用万用表检测线路通断与绝缘，核对 I/O 分配；上电逐点测试数字量 I/O，以信号发生器模拟传感器，检查 PLC 采集与输出模块驱动电磁阀、继电器动作，排查接线错误、短路及干扰。（3）整机联机仿真。联合 PLC 程序、虚拟 HMI 与仿真轴模型，模拟取料→送料→归位→复位循环，观察轴位置反馈与夹爪状态，验证报警及急停功能。通过联机仿真暴露逻辑冲突与时序问题，确保全流程运行完整可靠。

3.3 样机实验与性能测试

（1）实验平台搭建与测试方案。完成样机机械装配与电气接线，连接 PLC、伺服驱动器、传感器及 HMI，形成完整的硬件测试平台。制定系统测试方案：定位精度测试采用激光干涉仪作为基准测量工具；节拍测试采用高精度计时设备记录各动作段时间；稳定性测试执行连续 100 次循环运行，统计故障率与重复定位偏差，确保测试过程可追溯。（2）精度、效率与稳定性实测。通过多次重复定位测量，计算 X/Y/Z 轴的定位精度与重复定位精度，判定其是否满足设计指标（定位精度 $\leq \pm 0.05\text{mm}$ ，重复定位精度 $\leq \pm 0.02\text{mm}$ ）；统计分析各环节时间消耗，核算平均单环节节拍是否优于设计要求；连续运行过程中监测伺服驱动器电流波动和设备振动烈度，评估长期运行的稳定性与可靠性^[5]。（3）多工况适配性测试。选取不同材质、形状及尺寸的典型工件（含钼合金试件），分别测试夹持可靠性、取放成功率以及放置位置一致性。记录各项测试数据，验证设备在多工

况切换时的适应性与柔性切换能力，以及参数配方快速调整后的响应效果。

3.4 实验结果分析与问题优化

（1）数据整理与对标分析。系统整理精度测试、节拍统计和稳定性记录，绘制误差分布曲线与时序图，与设计技术指标逐一比对。明确各项指标的达标率与偏差范围，评估整机综合性能是否满足设计需求，确定需要重点改进的关键环节。（2）典型问题与原因分析。针对实验中出现的定位偏差超差、夹持滑移或振动偏大等典型问题，结合机械装配精度、伺服参数整定、程序逻辑设置等方面进行深入排查，追溯故障根源并归类整理，为后续优化指明方向。（3）针对性优化与验证。根据问题成因实施改进：对传动链施加预紧补偿以消除反向间隙；重新整定伺服 PID 参数并优化加减速曲线；完善程序中的延时与防错判断逻辑。将改进后的方案再次进行验证测试，通过数据对比确认问题得到有效解决，确保设备综合性能最终全面达到设计目标。

结束语

本文完成三轴模组与气动夹爪的机械设计、S7-1200PLC 控制系统开发及仿真测试。结果表明：设备结构紧凑、控制完善，运行稳定且适配多工况，可替代人工上下料，并为含钼、硫等敏感元素工件提供可靠自动化方案。后续将优化伺服参数与轨迹算法以提升节拍，并拓展智能监测与故障自诊断功能，增强智能化与柔性生产能力。

参考文献

- [1] 季海阳. 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(3): 443-452.
- [2] 李晓燕. 基于 EtherCAT 总线的激光剥离全自动线 PLC 上下料控制系统设计 [J]. 动力系统与控制, 2025, 14(2): 89-95.
- [3] 余文泉. 木竹板材自动上下料码垛装置控制系统设计与应用 [J]. 林业机械与木工设备, 2023, 51(12): 45-49.
- [4] 云立恒, 卢燕. 基于 PLC 的上下料机械手手臂设计 [J]. 锻压装备与制造技术, 2022, 57(6): 36-39.
- [5] 彭杰. 基于机器视觉的工件分拣及上下料系统设计 [J]. 制造业自动化, 2024, 46(9): 156-160.