

基于 S7 - 1500 PLC 与 ABB 机器人的智能 分拣系统协同控制研究

桂婷婷

(安徽工业经济职业技术学院 智能制造学院, 安徽 合肥 230051)

摘要: 针对传统工业分拣系统中可编程逻辑控制器 (PLC) 与机器人通信延迟高、定位精度不足、流程协同性差等问题, 以西门子 S7 - 1500 PLC 和 ABB IRB 1200 机器人为核心, 设计并实现一套智能分拣协同控制系统。通过构建开放平台通信统一架构 (OPC UA) 与工业以太网 (Profinet) 双通信架构, 优化 PLC 程序逻辑与机器人运动控制算法, 结合机器视觉实现物料精准识别与定位, 最终完成“物料检测 - 指令下发 - 机器人抓取 - 分类放置”全流程自动化。实验结果表明, 该系统通信延迟稳定在 5 ~ 8 ms, 机器人重复定位误差控制在 ± 0.03 mm 内, 分拣成功率达 99.2%, 较传统分拣系统效率提升 35%, 可满足电子元件、小型零部件等精密分拣场景需求, 为工业智能分拣的协同控制提供可落地的技术方案。

关键词: S7 - 1500 PLC; ABB 机器人; 协同控制; 智能分拣; OPC UA; Profinet

中图分类号: TP391.41; TP273

文章编号: 1000 - 0682(2026)02 - 0052 - 05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.02.011

Research on collaborative control of intelligent sorting system based on S7 - 1500 PLC and ABB robot

GUI Tingting

(Anhui Technical College of Industry and Economy, Anhui Hefei 230051, China)

Abstract: Aiming at the problems of high communication delay, insufficient positioning accuracy, and poor process collaboration between programmable logic controllers (PLC) and robots in traditional industrial sorting systems, an intelligent sorting collaborative control system is designed and implemented with Siemens S7 - 1500 PLC and ABB IRB 1200 robot as the core. By constructing a dual communication architecture of OPC UA and Profinet, optimizing PLC program logic and robot motion control algorithms, and combining machine vision to achieve precise material recognition and positioning, the entire process of "material detection - instruction issuance - robot grasping - classification placement" is finally automated. The experimental results show that the communication delay of the system is stable at 5 ~ 8 ms, the robot's repeated positioning error is controlled within ± 0.03 mm, and the sorting success rate reaches 99.2%, which is 35% more efficient than traditional sorting systems. It can meet the requirements of precision sorting scenarios such as electronic components and small parts, and provide a practical technical solution for collaborative control of industrial intelligent sorting.

Keywords: S7 - 1500 PLC; ABB robot; collaborative control; intelligent sorting; OPC UA; Profinet

收稿日期: 2025 - 09 - 29

基金项目: 安徽工业经济职业技术学院 2024 年院级质量工程项目“‘双高校’建设背景下, 服务地区新兴产业发展的高职院校电气自动化技术专业群课程数字化转型研究”(课题编号: 2024xjxyj03); 安徽工业经济职业技术学院 2024 年院级质量工程项目“《可编程控制器及应用》一流核心示范金课”(课题编号: 2024xyhsj12)

第一作者: 桂婷婷(1987—), 女, 安徽滁州人, 控制理论与控制工程专业, 硕士研究生, 讲师, 研究方向为电气控制及工业机器人集成。

E-mail: 594605347@qq.com

0 引言

在智能制造、汽车零部件等行业,智能分拣是工业生产流程中的关键环节,其效率与精度直接影响产品质量与产能。传统分拣系统多采用“PLC 单机控制+机器人手动示教”模式^[1],存在两大核心痛点:一是通信协同性差,PLC 与机器人多通过 I/O 点控或低速 Modbus(一种串行通信协议)通信,指令传输延迟超 20 ms,易导致物料漏抓、错抓;二是适应性不足,依赖人工示教路径,无法动态适配物料尺寸、姿态变化,当物料种类更换时,需重新调试,耗时较长。

文献[2]引入深度学习模型,能够识别复杂图像类型的物料信息,实现对多种复杂物料的高效分拣;文献[3]将机器视觉与 ABB 机器人结合,实现动态分拣,但采用 PLC 与机器人各自独立控制,协同性不足,分拣效率较低。现有研究尚未形成“PLC 主导-机器人执行-视觉辅助”的闭环协同架构,该文以此为突破点,结合 S7-1500 与 ABB 机器人的硬件特性,设计高精度、高柔性的智能分拣系统。

1 研究内容与创新点

设计 S7-1500 PLC 与 ABB 机器人、视觉系统和上位机之间的双通信架构(OPC UA 用于非实时数据交互,Profinet 用于实时控制指令传输),降低通信延迟。集成海康机器视觉模块,通过 S7-1500 PLC 处理视觉数据,生成机器人抓取坐标,实现动态定位。优化 PLC 分拣逻辑与机器人运动轨迹规划算法,提升流程协同性与分拣效率。搭建实验平台,验证系统在通信延迟、定位精度、分拣成功率等指标的性能。

提出“双通信优先级分配”策略,Profinet 传输实时控制指令(如抓取信号、位置指令),OPC UA 传输非实时数据(如手动操作、设备状态、分拣计数等),兼顾实时性与数据完整性。实施“PLC 主导的视觉-机器人协同”,由 S7-1500 直接处理视觉数据并生成机器人运动指令,避免视觉系统与机器人的直接通信延迟,定位响应速度提升 40%。

2 系统核心技术基础

2.1 通信协议

Profinet 是工业以太网协议,支持“实时(RT)”与“等时实时(IRT)”模式。ABB 机器人、S7-1500 PLC、海康机器视觉系统都支持 Profinet,可接入

同一总线网络,减少中间环节,提升数据传输效率。其中 S7-1500 作为 Modbus TCP 客户端,与作为服务器的 ABB 机器人进行 Profinet 通信^[4],同时又作为 Modbus TCP 服务器与作为客户端的视觉系统进行 Profinet 通信,交换机连接如图 1 所示。其关键特性包括:

(1)通信周期:RT 模式下最小周期 1ms,IRT 模式下同步精度 $\pm 1\mu\text{s}$,满足分拣系统实时控制需求;

(2)数据映射:通过 TIA Portal 与 RobotStudio 配置,将机器人“目标位置”“运动使能”等信号映射为 PLC 的 I/O 变量,实现指令直接交互;

(3)故障诊断:支持 Profinet 报警功能,当通信中断时,PLC 可实时接收机器人故障代码,触发急停或备用流程。



图1 交换机连接

OPC UA 是跨平台的通用通信协议,用于传输非实时数据^[5-6],优势在于数据兼容性上 S7-1500 通过 OPC UA 服务器(如 SIMATIC NET OPC Server),可向上位机传输“分拣数量”“设备运行时长”等统计数据;在安全性上支持用户认证、数据加密,避免工业数据泄露;同时灵活性,无需硬接线,通过软件配置即可扩展数据传输类型,适配多设备集成。

2.2 机器视觉定位原理

采用海康 MV-CS060-10GC 工业相机作为视觉传感器,与 S7-1500 PLC 通过 Profinet 通信,如图 2 所示。通过棋盘格标定方法^[7]校正镜头畸变并建立图像坐标与真实世界坐标的对应关系,同时依此建立机器人用户坐标系,方便机器人获取动态坐标。定位流程上首先用相机拍摄输送带上的物料图像,通过 Vision Master 软件进行图像处理(滤波、识别定位、输出);然后视觉系统将识别的物料类型、物料中心坐标(X, Y)与旋转角度(θ)通过 Profinet 发送给 PLC,PLC 计算机器人抓取点相对于相机坐标系的位置;通过坐标变换(将相机坐标系转换为机器

人用户坐标系),得到机器人抓取坐标(X_r, Y_r, Z_r);最后将物料类型及抓取坐标发至 ABB 机器人。



图 2 海康 MV-CS060-10GC 工业相机

2.3 ABB 机器人运动控制算法

针对分拣场景,优化 ABB 机器人的运动控制参数。采用“Joint Motion(关节运动)”模式,缩短机器人启停时间,适合短距离快速抓取;设定“运动重叠(Motion Overlap)”功能,机器人抓取物料的同时,PLC 控制输送带提前输送下一个物料,减少等待时间。

3 智能分拣系统设计

3.1 硬件系统架构

系统采用“三层架构”设计,硬件选型与功能如表 1 所示。

表 1 硬件选型与功能

架构层级	设备名称	型号规格	功能作用
控制层	S7-1500 PLC	西门子 S7-1500CPU 1516-3 PN/DP	系统核心,处理通信、逻辑控制、视觉数据
执行层	ABB 机器人	ABB IRB 120-3/0.6	执行物料抓取、分拣、放置动作
执行层	输送带	定制同步带输送带(速度 0.5 m/s)	输送物料,由 PLC 通过变频器控制启停
检测层	光电传感器	欧姆龙 E3Z-LS63	检测物料是否到达相机拍摄位置
检测层	工业相机	MV-CS060-10GC	采集物料图像,实现类型检测、视觉定位
检测层	压力传感器	西门子 QBE2003-P16	检测机器人抓手压力,确认物料抓取成功
通信层	Profinet 从站模块	ABB PN-16	实现机器人与 PLC 的 Profinet 通信
通信层	交换机	AOPRE B605G	连接 PLC、机器人、相机等设备,构建工业以太网



图 3 S7-1500 PLC

硬件连接逻辑:S7-1500 PLC 通过 Profinet 连接 ABB 机器人(PN-16 模块)及工业相机,通过 OPC UA/IP 连接上位机,通过模拟量输出模块(SM 1232)连接变频器,控制输送带速度。

3.2 软件系统设计

3.2.1 PLC 程序设计(基于 TIA Portal V18)

PLC 程序采用“结构化编程”,分为 4 个功能块(FB)。FB1 通信管理块实现 Profinet 与 OPC UA 通

信配置,包括机器人信号映射、相机信号映射、数据收发状态检测,当通信中断时,触发 DB100 中的“通信故障”标志位;FB2 视觉数据处理块接收相机发送的物料类型、坐标数据,对坐标数据进行坐标变换,计算机器人抓取点,存储至 DB200(分拣数据库);FB3 分拣逻辑控制块根据光电传感器信号,判断物料到位输送带停止同时触发相机拍摄;接收到“拍摄完成”信号后,向机器人发送“抓取”信号;当收到“抓取成功”信号(压力传感器反馈)后,控制输送带再次运行,当收到“分拣完成”信号后下发下一个抓取指令。FB4 故障处理块监测 PLC、机器人、相机的故障状态,包括机器人超程、机器人抓取失败、相机未连接等,触发声光报警器报警,并触发机器人停止。

3.2.2 ABB 机器人程序设计(基于 RobotStudio 2023)

机器人程序采用 RAPID 语言编写,核心流程如下:

```

PROCMain()
VARnum Xr, Yr, Zr,θ; // 机器人抓取坐标

```

```

VARbool Grab_Success; // 抓取成功标志
WHILE TRUE DO
    // 1. 等待 PLC 下发抓取指令
    WaitDI di_PLG_Grab_CMD, 1;
    // 2. 从 PLC 读取抓取坐标(通过 Profinet
    映射的变量)
    Xr := robtarget_Pos. X;
    Yr := robtarget_Pos. Y;
    Zr := robtarget_Pos. Z;
     $\theta$  := robtarget_Pos.  $\theta$ ;
    // 3. 运动至抓取位置(关节运动模式)
    MoveJ p_Grab := [Xr, Yr, Zr, 0, 0,  $\theta$ ], v1000,
    z50, tool0;
    // 4. 抓取物料(控制抓手闭合)
    SetDO do_Gripper_Close, 1;
    // 5. 检测抓取压力(压力传感器反馈)
    Grab_Success := Di_Pressure_OK;
    IF Grab_Success THEN
    // 6. 向 PLC 反馈抓取完成
    SetDO do_Grab_Finish, 1;
    // 7. 运动至分拣位置(根据物料类型
    选择放置点)
    IF di_Material_Type = 1 THEN
    // 物料类型 1
    MoveJ p_Place1, v1000, z50, tool0;
    ELSE // 物料类型 2
    MoveJ p_Place2, v1000, z50, tool0;
    ENDIF
    // 8. 释放物料
    ResetDO do_Gripper_Close, 0;
    SetDO do_Robot_Finish, 1;
    ELSE
    // 9. 抓取失败,返回初始位置
    MoveJ p_Home, v1000, z50, tool0;
    SetDO do_Gripper_Open, 1;
    // 10. 向 PLC 反馈抓取失败
    SetDO do_Robot_Error, 1;
    ENDIF
ENDWHILE
ENDPROC

```

3.3 系统工作流程

系统全流程分为 5 个步骤,实现“无人干预”的智能分拣:

(1) 物料触发($T_0 - T_1$):物料随输送带运动,触

发光电传感器($di_Material_Detect = 1$),传感器向 S7-1500 发送信号, $T_0 - T_1 < 1$ ms;

(2) 视觉定位($T_1 - T_2$):PLC 接收信号后,触发相机拍摄($do_Camera_Snap = 1$),相机处理图像并发送类型及坐标数据至 PLC, $T_1 - T_2 \approx 3$ ms;

(3) 指令下发($T_2 - T_3$):PLC 通过 Profinet 向机器人下发抓取坐标与指令($di_PLG_Grab_CMD = 1$),通信延迟 $T_2 - T_3 \approx 5$ ms;

(4) 机器人执行($T_3 - T_4$):机器人接收指令后,运动至抓取位置,完成抓取-分拣-放置动作, $T_3 - T_4 \approx 2$ s(根据分拣距离调整);

(5) 状态反馈($T_4 - T_5$):机器人向 PLC 反馈分拣完成信号($do_Robot_Finish = 1$),PLC 控制输送带继续输送下一个物料, $T_4 - T_5 \approx 2$ ms。

单个分拣周期约 2.01 s,每小时可分拣 1790 件物料,满足中高速分拣需求。

4 实验验证与结果分析

4.1 实验平台搭建

实验场景模拟电子元件分拣(物料为两种规格的电阻:规格 A(5 mm × 3 mm)、规格 B(8 mm × 5 mm),核心设备采用 S7-1500 PLC(1516-3 PN/DP)、ABB IRB 120 机器人、MV-CS060-10GC 工业相机;测试仪器采用示波器(泰克 TDS2024C,测量通信延迟)、高精度坐标测量仪(海克斯康 GLOBAL S,测量定位误差)、计数器(记录分拣数量与成功率)。

实验时长设置连续运行 8 小时,统计关键性能指标。

4.2 实验过程及结果

设计三组实验,分别验证系统的通信性能、定位精度与分拣效率。

实验 1 为通信延迟测试,将西门子 PRONETA Basic 3.8 调试和诊断工具^[8]接入 Profinet 网络,启动数据捕获。工具自动识别 Profinet 帧,记录发送端的“发送时间戳”和接收端的“接收时间戳”,工具自动计算两时间戳差值,直接显示延迟结果,重复测试 1000 次;记录 Profinet 平均通信延迟、延迟标准差。

将 UA Expert 诊断工具部署位“中间监控节点”,启动数据捕获,工具自动解析 OPC UA 消息流,标记“发送帧”和“接收帧”的时间戳。工具自动计算延迟值,并可统计延迟分布、峰值等数据^[9]。

表2 通信延迟测试结果

通信协议	平均延迟/ms	延迟标准差/ms	最大延迟/ms
Profinet (实时指令)	6.2	0.8	8.5
OPC UA (非实时数据)	18.5	2.1	23.3

Profinet 通信延迟远低于 OPC UA,且稳定性更高,满足分拣系统对实时控制的需求;OPC UA 延迟虽高,但可满足非实时数据传输(如统计信息),二者配合实现“实时-非实时”数据的分级处理。

实验2为定位精度测试,在输送带上随机放置50个物料(25个规格A、25个规格B),通过视觉定位与机器人抓取,用坐标测量仪记录机器人实际抓取位置与理论位置的偏差;记录平均定位误差、最大定位误差。

表3 定位精度测试结果

物料规格	平均定位 误差/mm	最大定位 误差/mm	误差满足要求 ($\leq \pm 0.05$ mm)比例
规格A (小物料)	0.021	0.035	100%
规格B (大物料)	0.018	0.029	100%

系统对两种规格物料的定位误差均控制在 ± 0.05 mm以内,其中大物料(规格B)的定位精度更高,原因是其轮廓更易识别;整体定位精度满足电子元件的精密抓取需求。

实验3为分拣效率与成功率测试连续输送1000个物料(两种规格各500个),统计8小时内的分拣总数、成功数量、失败数量(漏抓、错抓);记录每小时分拣效率、分拣成功率。

表4 分拣效率与成功率测试结果

测试指标	实验结果	传统分拣系统 (参考值)	提升 幅度
每小时分拣 效率	1782件/小时	1320件/小时	35%
分拣成功率	99.2% (992/1000)	92.5%	7.2%
失败原因 (8件)	5件物料偏移超 检测范围,3件抓 手压力不足	多为通信延迟 导致漏抓	-

系统分拣效率较传统系统提升35%,主要得益于“运动重叠”功能与低延迟通信;分拣成功率达99.2%,失败案例集中于物料极端偏移(超相机视野)与抓手压力参数适配问题,后续可通过扩大相机检测范围、优化压力阈值进一步提升。

5 系统优化与工程应用建议

5.1 现存问题与优化方向

物料姿态具有一定局限性,当物料倾斜角度超 15° 时,视觉识别易出现坐标偏差,导致抓取偏移。多物料混线分拣效率有瓶颈,当物料种类超3种时,PLC需增加分类逻辑判断,程序响应时间增加约1.2 ms。故障自恢复能力不足,通信短暂中断后,系统需人工重启,无法自动恢复分拣流程。

在 Vision Master 软件中增加“位置修正”和“畸变校正”,一定程度上有助于对因视角倾斜等因素导致的图像倾斜进行矫正,为后续角度测量和姿态识别提供更精准的图像基础。

PLC程序可采用模块化编程,将多物料分类逻辑封装为独立功能块(FB5:物料分类块),通过调用不同子模块减少程序冗余,响应时间可缩短至0.5 ms以内。

可设计故障自恢复,在FB4中增加“断点续存”功能,通信恢复后,PLC读取DB300中存储的末次分拣状态(如物料位置、分拣进度),自动触发后续流程,无需人工干预。

5.2 工程应用建议

现场安装时,工业相机需安装在输送带正上方300~500 mm处,避免强光直射;机器人基座与输送带保持固定间距,减少振动对定位精度的影响。

运维管理可持续优化,通过S7-1500的Web服务器功能^[10],搭建远程监控平台,实时查看设备运行状态,包括机器人电机温度、PLC通信负载,提前预警故障,如电机温度超 60°C 时触发报警。

6 结论

该文设计的基于S7-1500 PLC与ABB IRB 120机器人的智能分拣系统,通过Profinet与OPC UA双通信架构,实现实时指令与非实时数据的分级传输,通信延迟稳定在5~8 ms,满足工业实时控制需求;集成机器视觉与动态轨迹修正算法后,系统定位精度达 ± 0.03 mm,分拣成功率99.2%,每小时效率1782件,较传统系统效率提升35%,可适配电子元件等精密分拣场景;结构化的PLC程序与RAPID机器人程序设计,提升了系统的可维护性与扩展性,通过模块优化可进一步适配多物料、重型负载等复杂场景。

(下转第71页)

- [C]//Proceedings of the 29th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016:779-788.
- [10] REDMON J, FARHADI A. YOLO9000: better, faster, stronger[C]//Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017: 7263-7271.
- [11] REDMON J, FARHADI A. YOLOv3: An Incremental Improvement[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 89-95.
- [12] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: Single Shot Multibox Detector [C]//Proceedings of the 14th European Conference on Computer Vision. Amsterdam, 2016:21-37.
- [13] 王鑫杰,王吉平. YOLO 目标检测算法综述[J]. 广西物理, 2024, 45(02): 50-53.
- [14] 孔凡国,仇展明,王鑫,等. 基于 YOLOv5 的药剂识别定位系统设计[J]. 机械工程与自动化, 2025, 54(01): 188-189+192.
- [15] 沈斌,罗晓倩,王超. 基于改进 YOLOv5s 的煤矿车辆车牌检测方法[J]. 矿冶, 2025, 34(01): 177-184.
- [16] 陈江川,曹芷怡,余赠宇,等. 基于 YOLOv5 的农田病虫害检测识别方法[J]. 南方农机, 2025, 56(04): 112-117.
- [17] 王红君,刘紫宾,赵辉,等. 基于改进 YOLOv5 的苹果轻量化检测算法[J]. 农机化研究, 2025, 47(07): 65-71.
- [18] 张宏飞,冯永利,黄金凤. 改进 YOLOv5 的输送带缺陷检测[J]. 电子测量技术, 2024, 47(22): 161-168.
- [19] 李季,李恒昶,曾晨,等. 基于图像识别的雨量筒异物检测系统的设计与实现[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(06): 149-154.
- [20] 杨飞帆,李军. 面向自动驾驶的 YOLO 目标检测算法研究综述[J]. 汽车工程师, 2023(11): 1-11.
- [21] 戴佳兵,宋春芳,凌彩金,等. 基于 YOLOv5s-SE 和通道剪枝的虫咬紫金蝉茶检测方法研究[J]. 河南农业科学, 2024, 53(05): 157-163.
- [22] 江培营,陶青川,艾梦琴. 基于注意力机制和深度学习的钢板表面缺陷图像分类[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(09): 214-219.

(上接第 56 页)

后续可增加 1~2 台 ABB 机器人,由 S7-1500 PLC 实现“主-从机器人”任务分配,一台抓取、一台分拣,进一步提升分拣效率;同时可考虑 AI 算法融合,引入深度学习算法,替代传统机器视觉^[11],提升复杂背景下(如物料重叠)的识别准确率,适配更多非标准物料分拣;也可引入数字孪生集成,利用 TIA Portal 与 RobotStudio 的虚拟调试功能,构建系统数字孪生模型,实现“虚拟仿真-实物验证”的闭环开发,缩短现场调试周期。

参考文献:

- [1] 邵加晓,孙晓延. 基于 S7-1200 PLC 控制的产品分拣站系统设计与实现[J]. 中国仪器仪表, 2025(09): 66-71.
- [2] 张柱,南向瞳,刘海龙,等. 基于 PLC 和视觉识别的物料智能分拣系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2025(04): 16-20.
- [3] 张壺. 视觉机器人在工厂物料分拣中的应用[J]. 自动化应用, 2025, 66(14): 15-17.
- [4] 燕小勇. 基于 ABB 机器人与西门子 PLC 的 Profinet IO 通信的课程教学设计[J]. 办公自动化, 2024, 29(12): 10-12.
- [5] 温雪媛,张路,蒋玉明,等. 基于 OPC UA 协议的 PLC 数据采集系统改造方案[J]. 自动化应用, 2025, 66(01): 209-212.
- [6] 方隼,吴腾云,梁玉旋,等. 面向复杂制造业协同云平台的高速数据传输技术[J]. 电子设计工程, 2024, 32(20): 172-176.
- [7] 申心兰,王仲,刘常杰,等. 一种基于棋盘格的高精度分区域相机标定方法[J]. 测试科学与仪器, 2016, 7(004): 342-349.
- [8] 西门子(中国)有限公司. 适用于 PROFINET 的 PRO-NETA Basic 3.8 调试和诊断工具[Z]. 2024.
- [9] 温雪媛,张路,蒋玉明,等. 基于 OPC UA 协议的 PLC 数据采集系统改造方案[J]. 自动化应用, 2025, 66(01): 209-212.
- [10] 莫俊晖,许锦标. 基于嵌入式 PLC 模块的 WEB 监测系统[J]. 电子世界, 2021(04): 150-151.
- [11] 张琦. 基于计算机视觉的深度学习图像识别算法优化研究[J]. 信息与电脑, 2025, 37(19): 1-3.