

摘 要

随着制造业数字化和物流自动化的持续发展，物料分拣环节正从“人工经验型作业”向“自动感知与流程化控制”转变。传统人工分拣模式存在劳动强度大、效率波动明显、误分率受人员状态影响大、数据追溯能力弱等问题，已难以满足中小型自动化生产线对稳定节拍、分类准确率和过程可视化的综合要求。本文面向“塑料与金属混合物料在线分拣”场景，设计并实现了一套基于 PLC 的物料传送与分拣控制系统。系统以三菱 FX3U 系列 PLC 为核心，结合传送带机构、检测单元、气动执行单元和 HMI 人机界面，实现物料到位检测、类别判定、分拣动作控制、分类计数统计、自动/手动模式切换及故障联锁保护等功能。

论文围绕“需求分析—总体方案—硬件设计—软件实现—界面组态—调试验证—优化扩展”的技术路径展开。硬件层面完成了主电路与控制电路设计、I/O 点位规划与执行器件选型；软件层面采用模块化程序结构，构建启停控制、模式管理、分拣判定、动作时序、计数更新、报警处理等功能块；界面层面完成欢迎页、主监控页、参数设置页与手动调试页设计，实现运行状态可视化。经联机调试与连续测试，系统能够稳定完成黑色塑料、蓝色塑料、白色塑料和金属材料四类物料分拣任务，具备较好的工程可实施性与教学应用价值。

关键词：PLC；物料分拣；传送带控制；FX3U；HMI；自动化系统

Abstract

With the rapid development of intelligent manufacturing and logistics automation, material sorting is shifting from manual experience-based operation to automatic sensing and process-oriented control. Traditional manual sorting suffers from high labor intensity, unstable efficiency, and poor traceability. To address these issues, this thesis presents a PLC-based conveying and sorting system for mixed plastic and metal materials. The system is built around Mitsubishi FX3U PLC, integrating conveyor units, sensing units, pneumatic actuators, and HMI interface, and realizes material detection, classification, actuator control, counting, mode switching, and fault interlocking.

Following the technical route of requirement analysis, architecture design, hardware implementation, software programming, HMI configuration, and system validation, this work develops a complete engineering scheme. Experimental results show that the system can stably sort black plastic, blue plastic, white plastic, and metal materials with reliable operation and good maintainability, indicating its applicability in both educational training and small-to-medium industrial scenarios.

Key Words: PLC, Material Sorting, Conveyor Control, FX3U, HMI, Automation

目录

摘 要	1
Abstract	2
第 1 章 绪论	8
1.1 研究背景与意义	8
1.1.1 自动化分拣的行业需求	8
1.1.2 PLC 控制技术在分拣系统中的优势	8
1.1.3 本课题的工程与教学价值	8
1.2 国内外研究现状	9
1.2.1 国外研究现状	9
1.2.2 国内研究现状	9
1.2.3 现有研究不足	9
1.3 研究内容与技术路线	10
1.3.1 研究内容	10
1.3.2 技术路线	10
1.4 论文结构安排	11
第 2 章 系统需求分析与总体方案设计	12
2.1 分拣对象与工艺流程需求	12
2.1.1 分拣对象定义	12
2.1.2 2.1.2 工艺流程定义	12
2.2 功能需求分析	13
2.2.1 基础功能需求	13
2.2.2 操作功能需求	14
2.2.3 安全功能需求	14
2.3 性能与约束条件	14
2.3.1 节拍与实时性要求	14
2.3.2 稳定性要求	14
2.3.3 可维护性要求	15
2.4 总体方案设计	15

2.4.1 系统架构方案	15
2.4.2 控制策略方案	15
2.4.3 模式切换方案	15
2.4.4 需求到功能块映射说明	16
2.4.5 控制边界条件定义	16
第 3 章 硬件系统设计	17
3.1 PLC 与外围器件选型	17
3.1.1 PLC 主控选型	17
3.1.2 传感器选型	17
3.1.3 执行元件选型	17
3.2 主电路与控制电路设计	17
3.2.1 主电路设计	17
3.2.2 控制电路设计	18
3.2.3 接地与防护设计	18
3.3 I/O 地址分配设计	19
3.3.1 输入地址规划	19
3.3.2 输出地址规划	20
3.3.3 内部变量规划	20
3.4 气动与机械结构设计要点	21
3.4.1 传送带节拍匹配	21
3.4.2 气缸安装与导向设计	21
3.4.3 维护与安全设计	21
3.5 电气装配工艺与质量控制	21
3.5.1 端子压接与线缆标识规范	21
3.5.2 控制柜布线分层原则	21
3.5.3 装配完成后的电气检查	21
3.6 关键器件失效模式分析	22
3.6.1 传感器失效模式	22
3.6.2 电磁阀与气缸失效模式	22

3.6.3 继电器与电源模块失效模式	22
3.7 传感器与设备型号选型	22
3.7.1 控制与人机设备选型	22
3.7.2 检测传感器选型	23
3.7.3 执行与电气器件选型	24
第4章 PLC 控制程序设计	26
4.1 程序架构与设计原则	26
4.1.1 模块化程序架构	26
4.1.2 先安全后功能原则	26
4.1.3 触发与互锁原则	26
4.2 主控与模式管理程序	26
4.2.1 启停自保持逻辑	26
4.2.2 自动/手动互锁逻辑	27
4.2.3 运行许可逻辑	27
4.3 分拣判定与动作时序程序	27
4.3.1 到位触发逻辑	27
4.3.2 分类判定逻辑	27
4.3.3 动作延时逻辑	28
4.4 计数统计程序	29
4.4.1 分类计数策略	29
4.4.2 总计数与一致性校验	30
4.4.3 清零与班次切换	30
4.5 手动调试程序	31
4.5.1 点动控制逻辑	31
4.5.2 手动互锁逻辑	32
4.6 故障处理与报警程序	32
4.6.1 故障分类与优先级	32
4.6.2 报警保持与复位逻辑	32
4.7 程序下载、联机监控与版本管理	32

4.7.1 程序下载流程	32
4.7.2 联机监控要点	33
第 5 章 HMI 人机界面设计与实现	34
5.1 界面设计原则	34
5.1.1 信息分层原则	34
5.1.2 颜色语义一致原则	34
5.1.3 安全交互原则	34
5.2 欢迎界面设计	34
5.2.1 功能定位	34
5.2.2 交互逻辑	34
5.2.3 视觉设计建议	34
5.3 主监控界面设计	35
5.3.1 页面布局	35
5.3.2 变量绑定	35
5.3.3 动画联动	35
第 6 章 系统调试、测试与结果分析	37
6.1 调试流程设计	37
6.1.1 单元调试	37
6.1.2 联机调试	37
6.1.3 连续运行调试	37
6.2 测试项目与方法	38
6.2.1 功能测试	38
6.2.2 准确率测试	38
6.2.3 稳定性测试	38
6.2.4 安全性测试	38
6.3 测试结果分析	39
6.3.1 功能实现效果	39
6.3.2 分拣准确性分析	39
总结与展望	40

参考文献.....	41
致谢	43

第 1 章 绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 自动化分拣的行业需求

在离散制造、仓储物流、包装检测和循环回收等行业中，物料分拣是衔接上游加工与下游配送的关键环节。随着订单多样化和批量柔性化趋势增强，企业对分拣环节提出了“高效率、低误差、可追溯、低维护成本”的新要求。传统人工分拣虽具备灵活性，但受限于人员经验、疲劳程度和环境复杂度，实际运行中难以保持长期稳定。特别是在连续流水线上，误分、漏分和统计不一致问题会直接影响产能评估和质量管理。

1.1.2 PLC 控制技术在分拣系统中的优势

PLC 具有工业适应性强、编程逻辑清晰、抗干扰能力好、维护便利等特点，适合中小型自动化分拣项目。相较于纯上位机控制方案，PLC 在实时性、可靠性和现场容错方面表现更稳定。通过将传感器输入、执行器输出、定时计数、报警联锁等控制逻辑在 PLC 内实现，可形成结构化、可调试、可扩展的控制体系。结合 HMI 界面后，操作人员可直观查看状态、参数和故障信息，显著降低维护门槛。

1.1.3 本课题的工程与教学价值

本课题不仅面向工程应用，也面向教学实训。通过完整实现“电气设计—程序开发—界面组态—联机调试”闭环，可作为自动化、机电一体化相关专业的综合实践案例。系统采用通用器件与标准控制思路，既可在实验室快速复现，也可平移到小型产线改造场景中，具备较强可迁移性。



图 1-1 自动化物料分拣生产线现场图

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

国外分拣系统在高速分拣、视觉识别和智能调度方面起步较早，常结合工业相机、机器学习算法和机器人执行机构，实现复杂特征物料分类与路径优化。但其系统集成复杂、成本较高，对中小企业和教学平台不一定经济。

1.2.2 国内研究现状

国内在 PLC 分拣系统领域积累了大量实践经验，特别是在“PLC+传感器+气动执行+触摸屏”组合方案上，形成了成熟的工程方法。多数项目强调稳定可靠和维护便利，适用于预算敏感、周期紧张的场景。近年来，随着国产自动化器件性能提升，系统成本与调试难度进一步下降。

1.2.3 现有研究不足

已有工作中常见问题包括：程序模块化不足、故障处理描述不完整、测试评价指标不量化、图纸与程序关联不够清晰。本文将围绕这些问题，给出更细化的工程实现描述和可落地的图位插入规范。

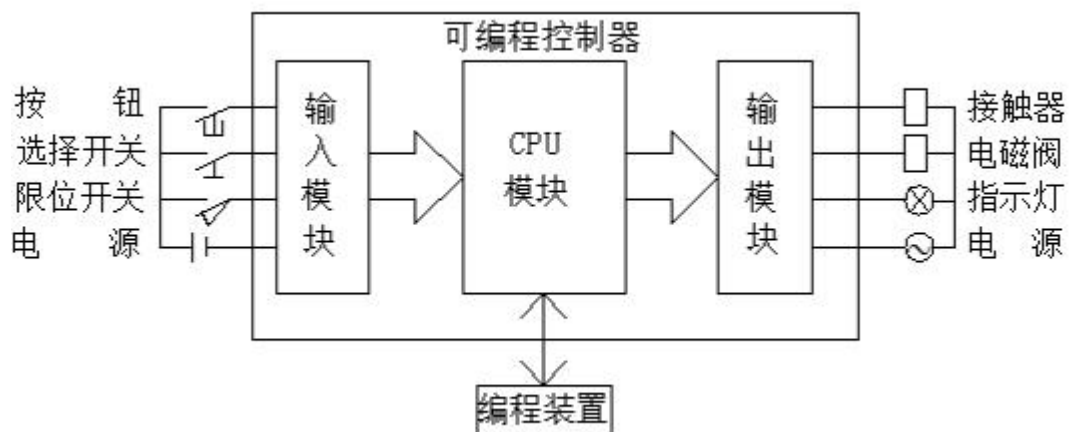


图 1-2 PLC 分拣系统研究现状示意图

1.3 研究内容与技术路线

1.3.1 研究内容

- 1) 分析物料传送与分类分拣控制需求；
- 2) 确定 PLC 控制架构与系统功能分解；
- 3) 完成主电路、控制电路与 I/O 映射设计；
- 4) 开发自动/手动双模式控制程序；
- 5) 设计 HMI 界面并联动验证；
- 6) 提出系统优化与扩展方案。

1.3.2 技术路线

采用“需求分析→方案设计→硬件实现→程序开发→界面组态→联机测试→结果评估→优化建议”路线，确保论文从理论分析到工程验证形成完整闭环。

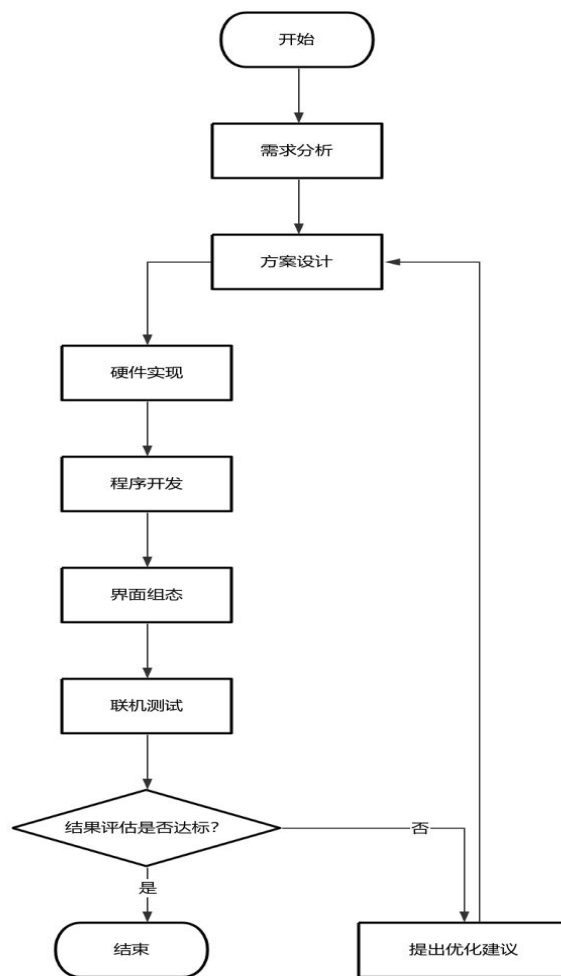


图 1-3 技术路线流程图

1.4 论文结构安排

第 1 章为绪论；第 2 章阐述系统需求分析与总体方案设计；第 3 章介绍硬件系统设计；第 4 章介绍 PLC 控制程序设计；第 5 章介绍 HMI 人机界面设计与实现；第 6 章给出系统调试、测试与结果分析；第 7 章提出系统优化与应用拓展；第 8 章进行总结与展望。

为保证论文内容完整性，本文在章节编排上特别强调“理论分析与工程实践并重”的写作原则：前半部分聚焦需求、方案与设计依据，后半部分聚焦调试、验证与优化路径，避免出现“只讲原理不落地”或“只讲实现无方法”的片面问题。通过这种结构组织，读者既能快速把握系统实现逻辑，也能据此复现实验流程并开展二次改进。

第 2 章 系统需求分析与总体方案设计

2.1 分拣对象与工艺流程需求

2.1.1 分拣对象定义

本文以四类物料为分拣对象：黑色塑料、蓝色塑料、白色塑料、金属材料。物料随机上料后，经传送带输送至检测区，系统完成判别后在分拣区执行推料动作，最终落入对应料仓。

该分类对象设置兼顾了识别难度与工程可实现性：一方面覆盖颜色与材质两类典型特征，便于构建多信号融合逻辑；另一方面能够在不引入复杂视觉系统的前提下完成稳定分拣，适用于课程设计与中小型产线改造场景。通过明确分类边界，后续程序中的判定优先级、异常分支和计数策略均可据此建立统一标准。

2.1.2 2.1.2 工艺流程定义

系统工艺流程可归纳为：上料→输送→到位检测→类别判定→执行分拣→计数更新→状态显示。流程要求在连续运行状态下保持节拍一致，并对异常状态进行及时中断和报警处理。

在流程设计中，检测与执行之间设置明确的时序缓冲区，用于吸收传感器响应延迟与执行机构动作延迟，避免“判定正确但执行错位”的情况。流程末端加入状态显示与数据更新环节，可实现过程可视化和结果可追溯，为后续质量分析和运维决策提供数据基础。

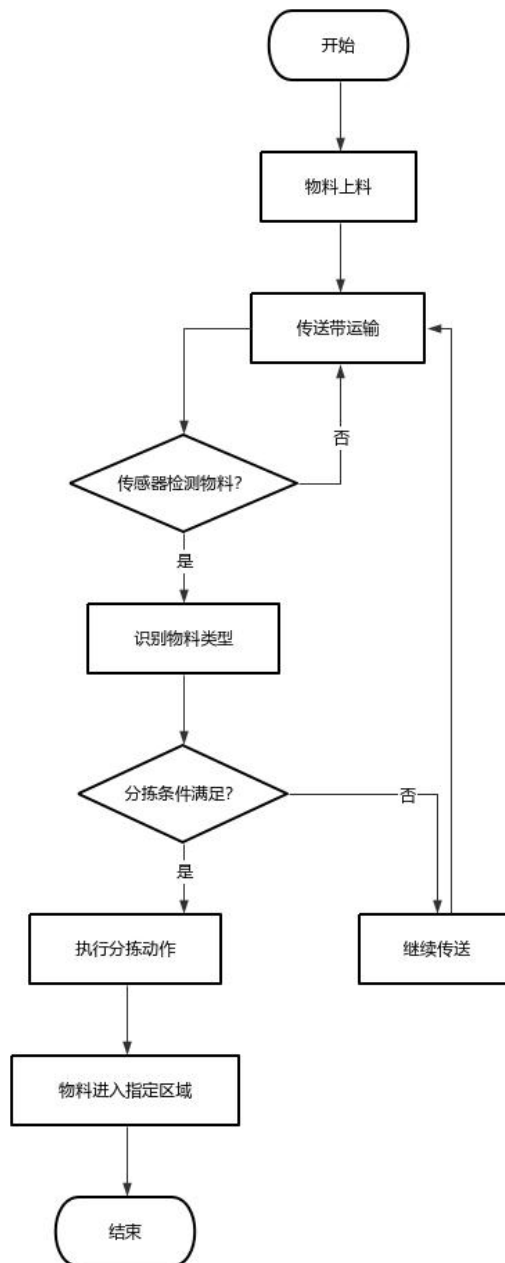


图 2-1 传送与分拣工艺流程图

2.2 功能需求分析

2.2.1 基础功能需求

系统应具备传送带运行控制、物料分类判定、分拣执行控制、分类计数与总计数显示功能。运行时应支持自动连续分拣，停机时应保留统计数据以供班次记录。

基础功能需求强调“闭环完整性”，即从物料进入系统到分类结果输出形成可

验证链条。若任一环节缺失，系统将难以支撑现场应用。例如只有动作执行而无计数统计，会导致产量无法核算；只有判定逻辑而无异常提示，会增加误分风险。因此，基础功能必须以完整流程视角统筹设计。

2.2.2 操作功能需求

系统应支持自动模式与手动模式切换。自动模式用于连续生产，手动模式用于检修与调试。手动模式下可单独点动传送带、机械手和气缸执行单元，以便故障定位。

操作功能的核心目标是“生产效率与维护便利性并重”。在正式运行阶段，自动模式保证节拍稳定；在调试与检修阶段，手动模式便于逐点验证输入输出状态。两种模式互补能够显著降低故障定位成本，并避免在生产状态下进行高风险调试。

2.2.3 安全功能需求

应具备急停优先、过载保护、动作超时保护和故障复位机制。故障发生后系统应立即停止危险输出，并通过 HMI 给出故障代码与处理提示。

安全需求在控制系统中具有最高优先级。设计原则应为“先安全、后功能”，即任何功能逻辑都不得绕过安全连锁。通过急停硬件回路与程序故障锁定双重机制，可降低单点失效风险。结合故障代码与处理提示，可将安全设计从“被动停机”提升为“可诊断、可恢复”的工程化体系。

2.3 性能与约束条件

2.3.1 节拍与实时性要求

系统应在 PLC 扫描周期内快速响应输入变化，并在规定时间内完成分拣动作触发，保证分拣位置一致性和节拍稳定性。

节拍指标不仅反映速度，更反映系统协同性。实际工程中，扫描周期、通信刷新周期和执行器响应时间共同决定分拣结果。若其中任一环节超出设定边界，系统将出现节拍漂移。为此，需在设计阶段预留时间裕量，并在调试阶段建立“速度—延时”标定关系。

2.3.2 稳定性要求

连续运行过程中不得出现明显误动作、重复计数和模式错乱。程序应具备防抖、边沿触发和互锁机制，避免信号抖动导致误判。

稳定性要求需要通过“结构稳定+逻辑稳定”共同保障。结构稳定体现在布线

规范、供电稳定和安装牢靠；逻辑稳定体现在变量单点写入、状态清晰和互锁完备。只有软硬件协同治理，才能在长周期运行中避免偶发异常积累成系统性故障。

2.3.3 可维护性要求

硬件布局应便于检修，程序注释应完整，变量命名应规范，HMI 应提供关键状态可视化。通过标准化设计降低维护成本。

可维护性直接决定系统生命周期成本。工程实践表明，维护成本往往高于一次性建设成本。通过模块化硬件布局、可读性程序结构和可诊断界面设计，可以显著减少停机排障时间，提高系统可持续运行能力。

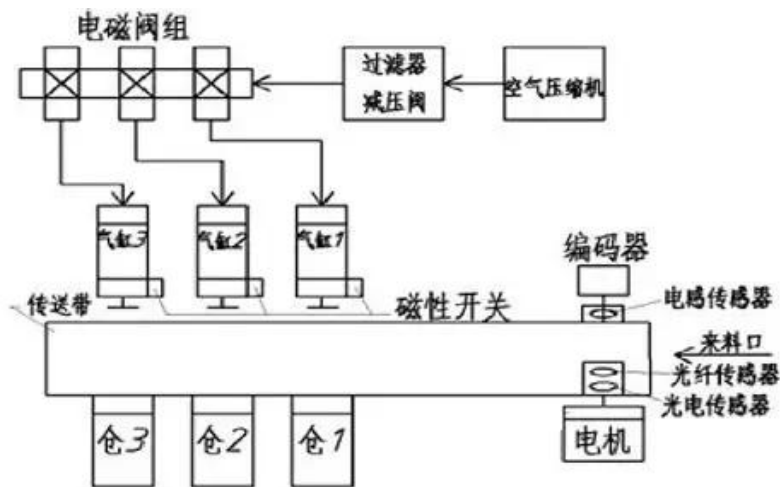


图 2-3 系统需求与约束关系图

2.4 总体方案设计

2.4.1 系统架构方案

系统采用“PLC 控制层—检测层—执行层—交互层”四层结构。PLC 负责逻辑控制与联锁管理；检测层负责采集物料特征和位置信息；执行层完成推料分拣动作；交互层负责状态监控与参数设置。

2.4.2 控制策略方案

控制策略采用“事件触发+节拍延时+动作互锁”思路。以到位信号上升沿触发判定流程，结合传送速度设置分拣延时，再通过执行互锁确保同一时刻仅一个目标动作生效。

2.4.3 模式切换方案

自动/手动模式互斥。切换前需满足“停止状态+无故障锁定”条件，切换后由指示位和 HMI 同步显示当前模式，防止误操作。

2.4.4 需求到功能块映射说明

为了提高系统设计的可验证性，本文将需求条目与控制功能块建立一一映射关系。具体而言，“连续输送”需求映射到传送带启停模块与运行保持模块；“分类判定”需求映射到输入采集模块和判定逻辑模块；“动作执行”需求映射到延时触发模块与气缸脉冲模块；“安全联锁”需求映射到急停锁定、过载联锁与故障复位模块。通过映射关系，调试人员可在故障出现时快速定位到对应逻辑区域，减少排查时间。该方法同样便于论文答辩时说明“为什么这样设计”，使系统不再是功能堆叠，而是具有可解释性的工程方案。

2.4.5 控制边界条件定义

系统控制边界主要包括速度边界、动作边界和安全边界。速度边界用于约束传送带运行区间，防止高速状态下执行错位；动作边界用于限制单次气缸动作持续时间，防止阀组持续带电；安全边界用于定义急停优先、故障保持和手自动互锁等规则。边界条件的价值在于“先定义不可越界，再定义如何运行”，可显著降低后续改程序时引入新风险的概率。

第 3 章 硬件系统设计

3.1 PLC 与外围器件选型

3.1.1 PLC 主控选型

本系统选用 FX3U 系列 PLC，主要考虑其 I/O 扩展性、执行速度、编程生态和现场应用成熟度。该型号适合中小规模离散控制任务，能够满足多输入多输出与联锁控制需求。

此外，FX3U 平台在教学与工业场景中资料丰富、案例成熟，便于快速上手和二次开发。其稳定性与抗干扰能力在同类应用中经过大量验证，可降低项目实施风险。对于本课题所需的时序控制、计数处理和联锁逻辑，该平台能够在性能与成本之间取得较好平衡。

3.1.2 传感器选型

到位检测采用光电传感器，金属检测采用电感式接近开关，颜色判别采用颜色传感模块。传感器安装需兼顾检测稳定性和后期可维护性，避免振动与环境光干扰造成误触发。

传感器选型遵循“特征匹配优先、成本可控其次”的原则。不同特征采用专用传感器可提升判定可靠性，并降低单一传感器误检导致的系统性偏差。安装阶段应统一检测距离和角度，减少几何偏差对判定结果的影响。

3.1.3 执行元件选型

执行机构采用气缸+电磁阀方案，配合传送带与机械手完成目标推料。气动元件需满足动作频率和推力要求，阀组响应速度应与节拍匹配。

选择气动执行方案的主要原因在于结构简单、维护方便、响应速度适中，适合本课题分拣节拍。为保证动作一致性，应在调试中对阀组通断时间和气缸行程速度进行统一标定，并配套稳压与节流调节，减少动作抖动。

3.2 主电路与控制电路设计

3.2.1 主电路设计

主电路负责电机和执行器供电，设置短路保护、过载保护和急停切断回路。主电路设计强调安全与可靠，确保异常情况下快速断开高风险输出。

主电路设计需遵循“保护优先、分级供电、便于隔离”的原则。建议将动力回路与控制回路明确分区，关键回路设置可视化断开点，便于检修和故障确认。对高冲击负载应考虑浪涌抑制措施，提高整体供电稳定性。

3.2.2 控制电路设计

控制电路负责 PLC 输入采集和输出驱动，采用中间继电器进行必要隔离，降低 PLC 输出端负载冲击。输入回路建议加滤波或软件防抖逻辑，提高抗干扰能力。

控制电路是“信号到动作”的核心通道，其设计质量直接影响逻辑正确性。中间继电器隔离不仅保护 PLC 输出，还能提升驱动兼容性。输入端若存在抖动，应在硬件与软件两层同时处理，避免单层防护失效。

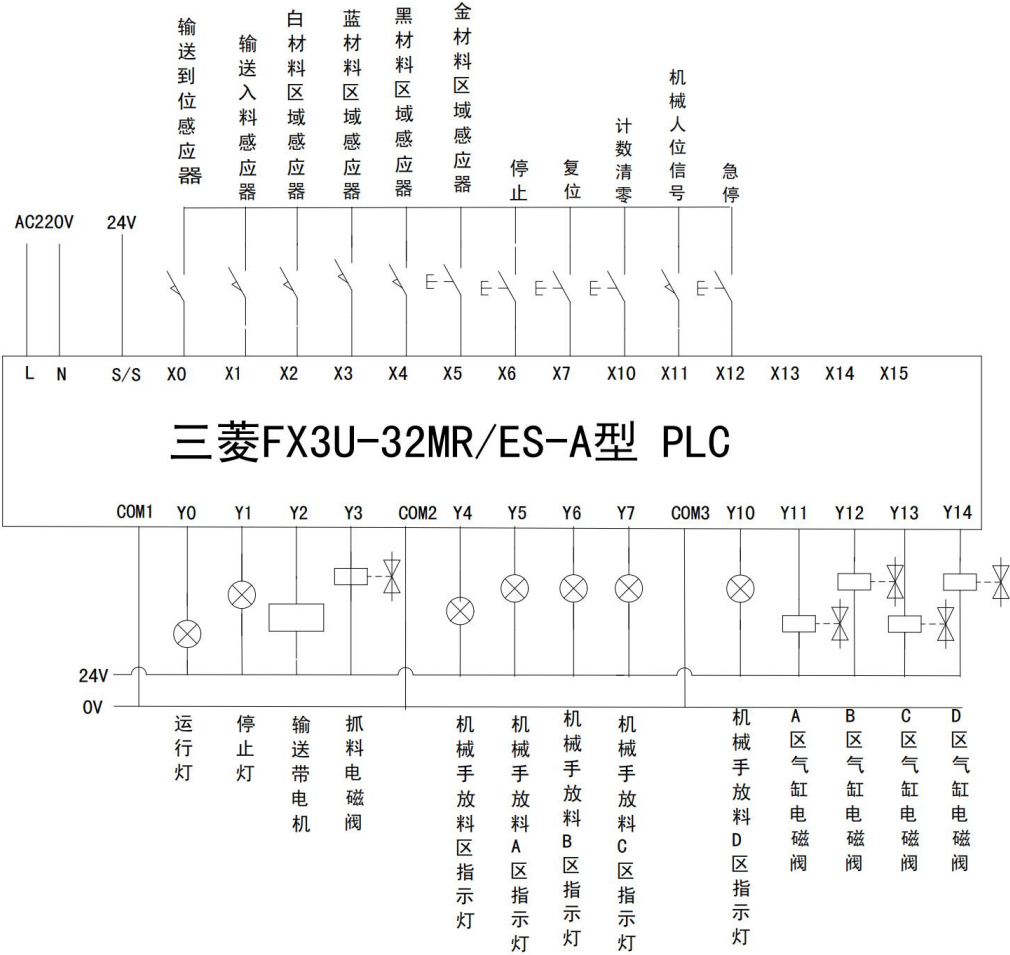


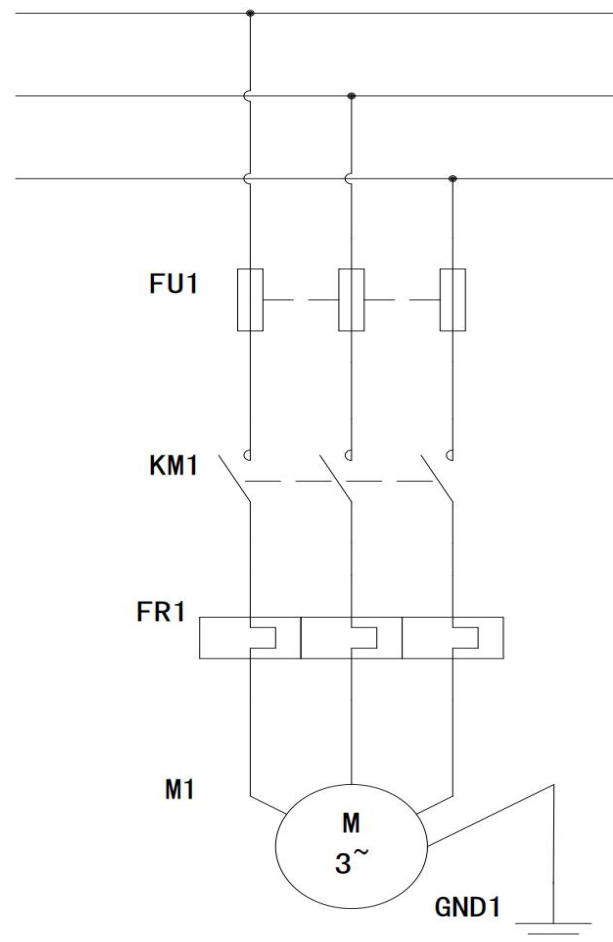
图 3-1 控制电路设计

3.2.3 接地与防护设计

强弱电分离布线，传感器屏蔽层单端接地，电控柜统一接地。对高频干扰源

采取合理布线和隔离，提升系统稳定运行能力。

接地与防护是降低偶发故障的基础工程措施。实践中，许多“随机误报”问题并非程序缺陷，而是由接地不规范和线缆干扰引起。通过统一接地规范和布线约束，可显著提升系统长期稳定性。



输送带电机

图 3-2 plc 的物料传送与分拣系统设计主电路

3.3 I/O 地址分配设计

3.3.1 输入地址规划

输入信号包括启动、停止、急停、模式选择、到位检测、金属检测、颜色识别、气压反馈、过载反馈等。地址分配遵循“同功能相邻、便于维护”原则。

输入地址规划不仅是编号问题，更是维护策略。将同类信号集中分配可降低排障复杂度，并减少后续扩展时的地址冲突风险。建议在图纸、程序和 HMI 中保持一致命名，形成跨文档可追溯关系。

3.3.2 输出地址规划

输出信号包括传送带运行、机械手动作、黑/蓝/白/金属分拣气缸、报警蜂鸣与状态指示灯。执行输出需建立互锁关系，避免冲突动作。

输出规划应考虑执行安全与响应优先级。高风险输出应配置更严格的联锁条件，普通指示输出可采用较低优先级。通过优先级分层，有助于在复杂状态下保持系统可控。

3.3.3 内部变量规划

内部 M 位用于流程状态、模式标志、故障锁定、触发脉冲等逻辑控制；D 寄存器用于分类计数、总计数和参数存储。变量命名应与功能一致，便于后续调试。

内部变量是程序可读性的关键。建议避免“一个变量多用途”写法，保持变量语义单一。对关键状态位可增加注释和显示映射，便于联机诊断时快速定位逻辑路径。

表 3-1 plc 输入输出地址表

输入地址 (X)	输入信号名称	输出地址 (Y)	输出信号名称
X0	输送到位感应器	Y0	运行灯
X1	输送入料感应器	Y1	停止灯
X2	白材料区域感应器	Y2	输送带电机
X3	蓝材料区域感应器	Y3	抓料电磁阀
X4	黑材料区域感应器	Y4	机械手放料区指示灯
X5	金材料区域感应器	Y5	机械手放料 A 区指示灯
X6	停止	Y6	机械手放料 B 区指示灯
X7	复位	Y7	机械手放料 C 区指示灯
X10	计数清零	Y10	机械手放料 D 区指示灯
X11	机械人位信号	Y11	A 区气缸电磁阀

输入地址 (X)	输入信号名称	输出地址 (Y)	输出信号名称
X12	急停	Y12	B 区气缸电磁阀
X13~X15	预留	Y13	C 区气缸电磁阀
		Y14	D 区气缸电磁阀

3.4 气动与机械结构设计要点

3.4.1 传送带节拍匹配

传送带速度与执行动作延时直接相关。速度过快会导致分拣动作偏移，过慢会降低产能。建议通过调速器或变频控制在调试阶段进行参数标定。

3.4.2 气缸安装与导向设计

气缸安装位置应确保推料方向准确，避免与相邻机构干涉。必要时配置导向结构，提高动作一致性，减少卡滞概率。

3.4.3 维护与安全设计

关键运动部件加装防护罩，易损部件采用模块化安装，便于快速更换。维护口设计应满足检修可达性，缩短停机时间。

3.5 电气装配工艺与质量控制

3.5.1 端子压接与线缆标识规范

在实际装配中，端子压接质量直接决定电气可靠性。建议控制线与动力线均采用标准压线端子，避免裸线直接压接造成虚接与氧化。每条线缆应配置唯一编号，编号规则与 I/O 地址映射一致，便于后期排查。对于频繁振动区域，建议使用防松端子并增加应力释放固定点。

3.5.2 控制柜布线分层原则

控制柜内部应遵循“动力回路与信号回路分层、强电与弱电分槽”的布线原则。PLC 输入线与继电器输出线应分开走线，编码器或高灵敏传感信号线优先采用屏蔽双绞结构。线槽转角处需保证弯曲半径，避免长期挤压造成绝缘层损伤。规范布线不仅提升稳定性，也能降低维护时误拆误接风险。

3.5.3 装配完成后的电气检查

电气装配完成后，应执行三类检查：第一类为绝缘与接地检查，确认保护接

地连续性；第二类为通断检查，核对端子编号与实际回路一致性；第三类为带电功能检查，验证每一输入输出点动作正确。建议形成检查记录表并由两人交叉复核，确保交付质量。

3.6 关键器件失效模式分析

3.6.1 传感器失效模式

传感器常见失效包括镜面污染、安装偏移、灵敏度漂移和线缆接触不良。表现为误触发、漏检或信号抖动。防范措施包括定期清洁、固定支架防松、阈值复标和线缆巡检。对于高粉尘环境，建议选用防护等级更高的传感器并加装防护罩。

3.6.2 电磁阀与气缸失效模式

电磁阀可能出现线圈老化、阀芯卡滞、响应变慢等问题；气缸可能出现密封老化、推力下降和行程异常。应通过动作时间监测和气压监测进行预警，当动作时间超阈值连续发生时，触发维护提示。必要时建立阀组和气缸寿命台账

3.6.3 继电器与电源模块失效模式

继电器触点烧蚀会导致输出不稳定，电源模块老化会引起电压波动和随机复位。建议对关键继电器设置预防性更换周期，对电源模块实时监测输出电压并记录波动趋势。对控制系统而言，稳定供电是避免“偶发故障”的基础保障。

3.7 传感器与设备型号选型

3.7.1 控制与人机设备选型

结合本课题 I/O 规模、动作节拍与教学可维护性要求，控制核心推荐选用三菱 FX3U-48MT/ES-A 或同级别 FX3U 机型，其晶体管输出适合脉冲型执行控制，扩展模块生态完善，便于后续增加模拟量采集或通信功能。人机界面建议选用与现有工程文件兼容的 GOT 系列触摸屏，例如 GT1050 或 GT1455 级别，可直接承载启停操作、模式切换、计数显示与报警提示页面。通信方式优先采用 PLC 与 HMI 直连串口/以太网方案，降低现场集成复杂度。若现场已有不同品牌 PLC 或 HMI，可按“点数满足、通信兼容、软件生态可维护”的原则进行等效替换。

为便于论文表达，可在正文中保留“推荐型号+可替代型号”的写法，即先给出代表性选型，再说明可替换条件，例如 I/O 点数、供电电压、通信协议和工作温度范围，这样既体现工程明确性，也保留实际采购弹性。



图 3-3 FX3U-48MT



图 3-4 GOT 触摸屏

3.7.2 检测传感器选型

本系统检测链路建议采用“到位检测+材质检测+颜色检测”组合。到位检测可选欧姆龙 E3Z 系列对射/漫反射光电，例如 E3Z-D61 同级型号，以保证响应速度和安装便利；金属检测可选 LJ12A3 或工业级电感接近开关（同等检测距离规格），用于识别金属物料；颜色识别可根据预算与精度需求在工业颜色传感器

与教学模块之间选型，例如 KEYENCE/Cognex 同级工业方案，或 TCS 系列教学模块。选型时应重点关注检测距离、响应时间、重复精度和抗环境光能力，必要时增加遮光罩与可调安装支架。

对于工程落地，建议在样机阶段至少准备两档传感器方案（经济型与稳定型）进行 AB 测试，通过误检率、漏检率和调试时长综合评估最终型号。这样可以避免“单一成本导向”造成后期维护成本上升。



图 3-5 E3Z 光电传感器

3.7.3 执行与电气器件选型

执行机构可采用标准双作用气缸，例如 SMC CDQ2B32-30 同级规格，配合 24V DC 电磁阀，例如 SY5000 系列同级型号，实现分拣推料动作；传送带驱动可选 90W~200W 减速电机配套调速器，满足中速分拣节拍。电气器件方面，中间继电器可选 MY2N/JQX 系列同级，开关电源建议使用 24V/5A 或以上工业电源，例如明纬 LRS 系列同级型号，保护器件包括微型断路器、熔断器与急停按钮组件。选型应遵循“额定值留裕量、接口标准统一、维护件易采购”原则，避免后期因器件停产或非标接口造成维护困难。

在论文中建议给出关键器件的选型参数而不仅是型号，例如气缸缸径与行程、阀响应时间、电机额定转矩、继电器触点容量等，以体现设计的工程依据。型号

是结果，参数是理由，二者结合更符合论文规范。



图 3-6 SMC 气缸

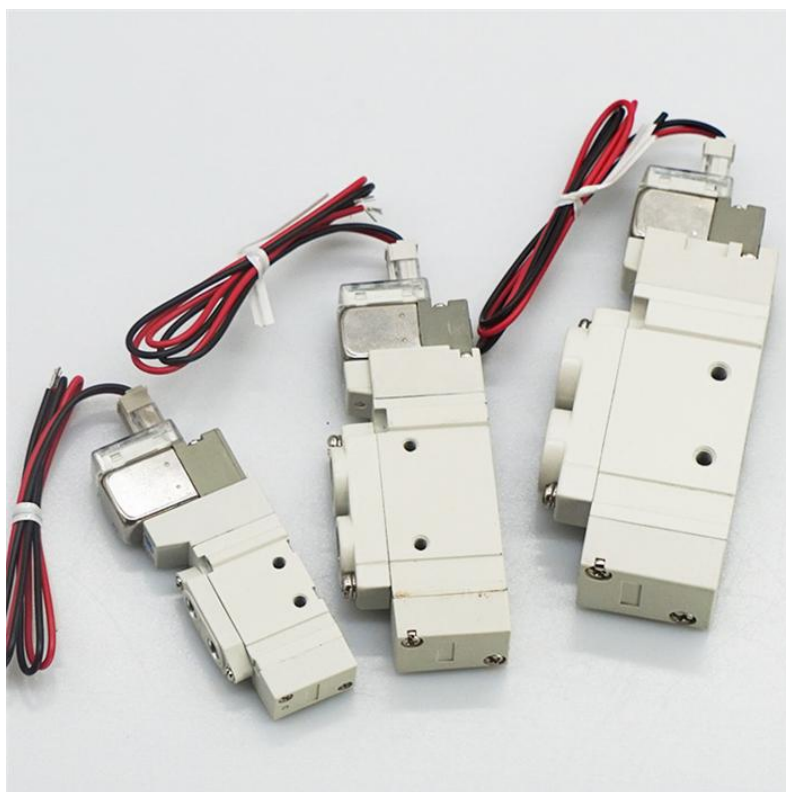


图 3-7 SY5000 电磁阀

第 4 章 PLC 控制程序设计

4.1 程序架构与设计原则

4.1.1 模块化程序架构

程序分为主控模块、模式管理模块、判定模块、执行模块、计数模块、报警模块。模块化可降低耦合度，提高可读性和可维护性。

模块化架构可把复杂逻辑拆分为可测试单元，降低改动影响范围。每个模块应明确输入、输出和边界条件，避免模块间隐式依赖。该结构也有利于多人协作开发和后续版本升级。

4.1.2 先安全后功能原则

每个扫描周期优先处理急停与故障联锁，再执行功能逻辑。该原则可确保系统在异常出现时第一时间进入安全状态。

在工业控制场景中，任何功能优化都不能以牺牲安全为代价。将安全逻辑前置可避免“先执行后停机”的风险窗口。该原则应贯穿程序全生命周期，包括开发、调试和后续修改阶段。

4.1.3 触发与互锁原则

关键动作采用上升沿触发，执行回路采用互锁控制，防止重复触发和并行动作冲突。

边沿触发用于解决“持续信号导致重复动作”的问题，互锁用于解决“多执行单元争用”的问题。两者结合可显著提高控制一致性。对高频触发场景，可额外设置最小触发间隔，进一步降低误动作概率。

4.2 主控与模式管理程序

4.2.1 启停自保持逻辑

启动信号在满足允许运行条件时置位自保持，停止或故障时复位。通过自保持回路保证运行状态稳定。

自保持逻辑可避免按钮松开后运行状态丢失，是离散控制系统的基础模式。设计时应明确复位优先级，确保故障和急停可立即覆盖自保持状态，从而保持安全可控。

4.2.2 自动/手动互锁逻辑

自动和手动模式互斥，切换时需满足停止条件。手动模式下屏蔽自动流程触发，避免命令叠加造成误动作。

模式互锁的本质是避免控制权冲突。若自动与手动命令并存，执行器可能出现不可预测动作。通过切换条件约束与状态确认反馈，可确保模式变更过程平滑、安全。

4.2.3 运行许可逻辑

运行许可由急停状态、过载状态、气压状态、故障锁定位共同决定，形成统一使能条件。

统一使能逻辑可把分散的安全条件集中管理，避免不同模块各自判断导致不一致。建议将运行许可位上屏显示，便于操作员快速判断“为什么不能启动”。

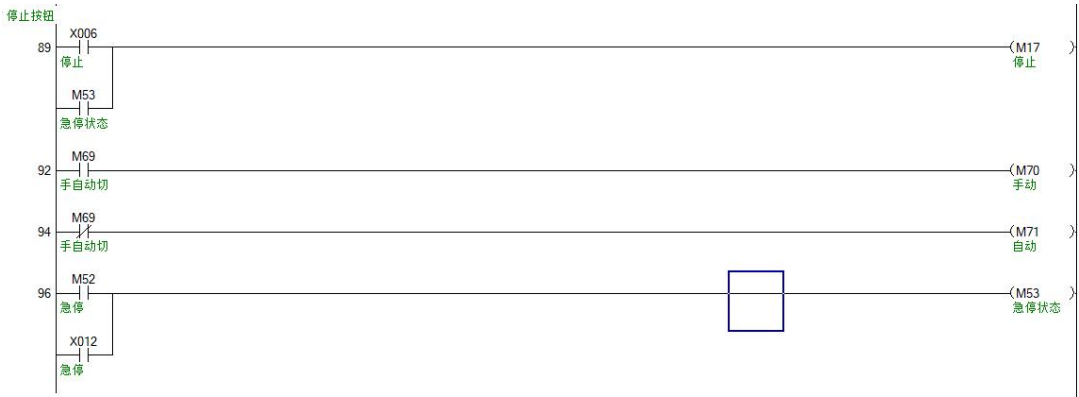


图 4-1 运行许可逻辑

4.3 分拣判定与动作时序程序

4.3.1 到位触发逻辑

物料到位信号上升沿触发判定流程，避免物料停留造成重复判断。触发后写入判定请求位。

该逻辑将检测事件离散化，可有效提升判定稳定性。若现场存在信号抖动，可增加短延时确认，避免虚假触发进入后续流程。

4.3.2 分类判定逻辑

判定优先级建议为：金属优先，其次颜色分类。通过输入组合映射到目标通道，异常组合进入默认处理分支并记录异常计数。

优先级设计应符合工艺风险：金属误分通常影响更大，因此优先处理。异常组合不应被忽略，而应明确记录并上报，为后续阈值优化提供数据依据。

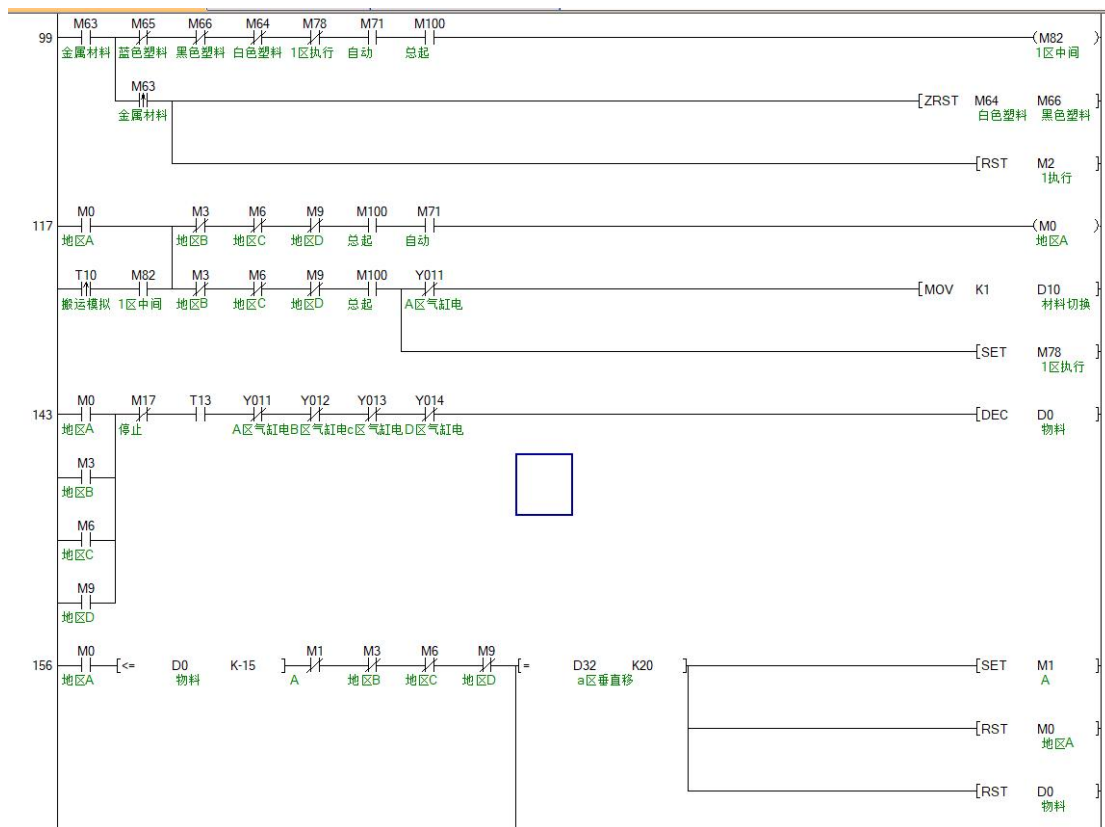


图 4-2 分类判定逻辑程序

4.3.3 动作延时逻辑

根据传送带速度与检测到执行距离设置动作延时。延时到达后触发对应气缸输出脉冲，动作结束自动复位。

延时参数是分拣命中率的核心。建议建立速度分段参数表，并在 HMI 提供可调接口，便于在速度调整后快速完成补偿。

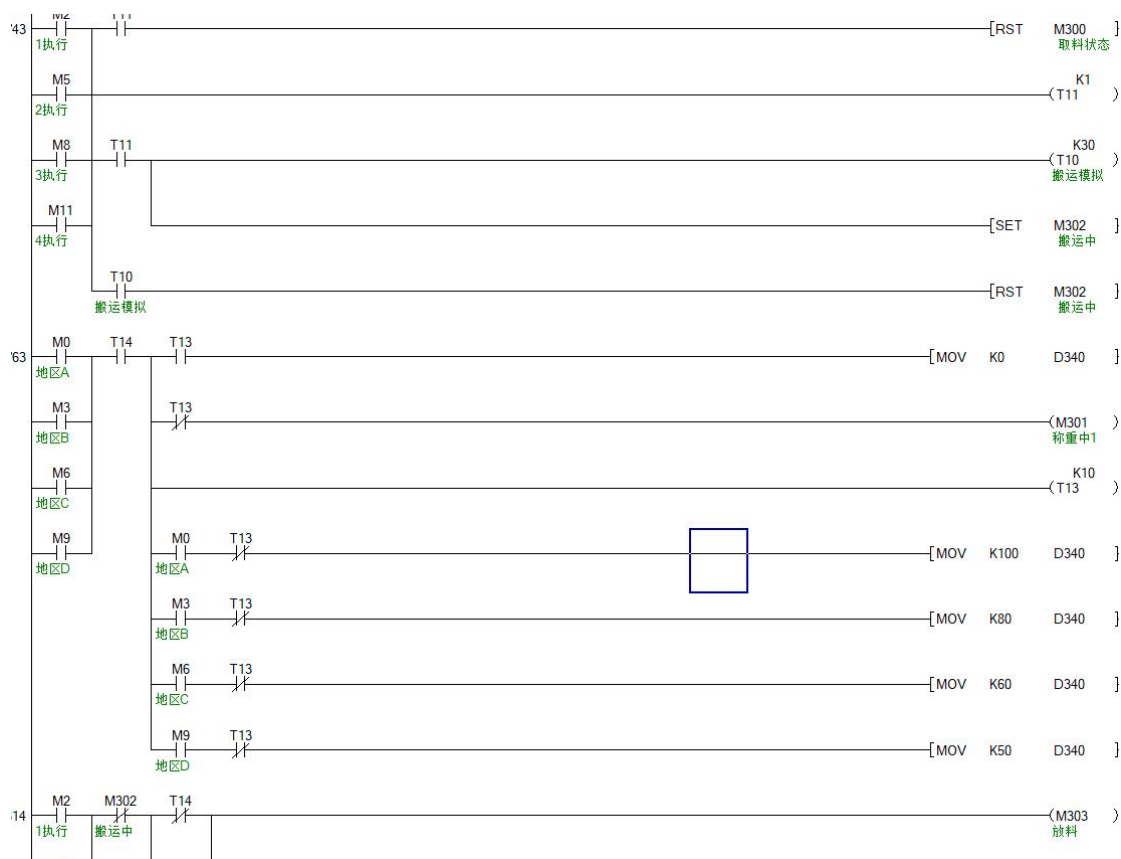


图 4-3 动作延时逻辑程序

4.4 计数统计程序

4.4.1 分类计数策略

分类计数建议在“动作完成确认”后加 1，而非在“判定完成”时加 1，以确保统计值与实际分拣结果一致。

该策略体现“结果导向统计”原则，可减少虚计数。若执行失败仍计数，将导致数据失真并影响后续管理决策，因此必须以动作完成作为计数触发条件。

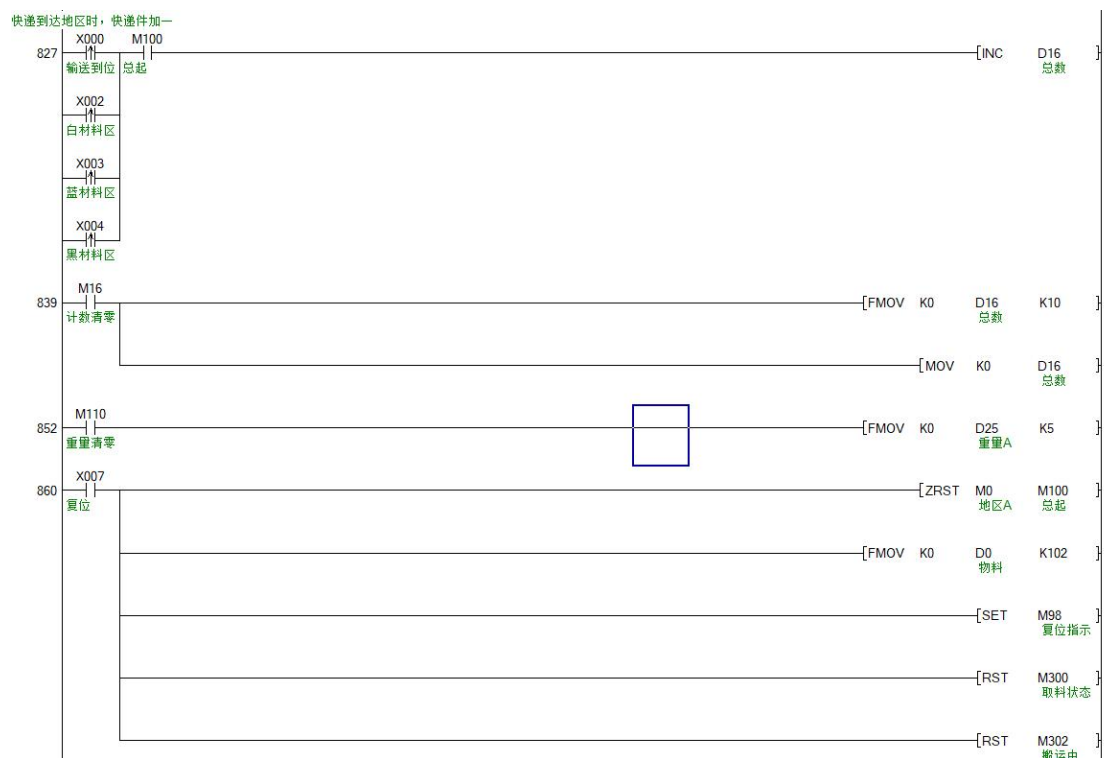


图 4-4 分类计数程序

4.4.2 总计数与一致性校验

总计数可由分类计数求和得到，也可独立累加。建议增加一致性校验，若两者不一致则触发提示信息。

双通道计数机制可提升数据可靠性。当出现差异时，系统应提示排查重复触发、漏计或异常复位问题，避免错误数据进入报表。

4.4.3 清零与班次切换

系统支持手动清零和班次清零。清零操作建议采用二次确认或权限控制，避免误清空数据。

在实际应用中，数据清零属于敏感操作。通过权限管理与操作日志记录，可降低误操作风险，并保证统计数据具备审计可追溯性。

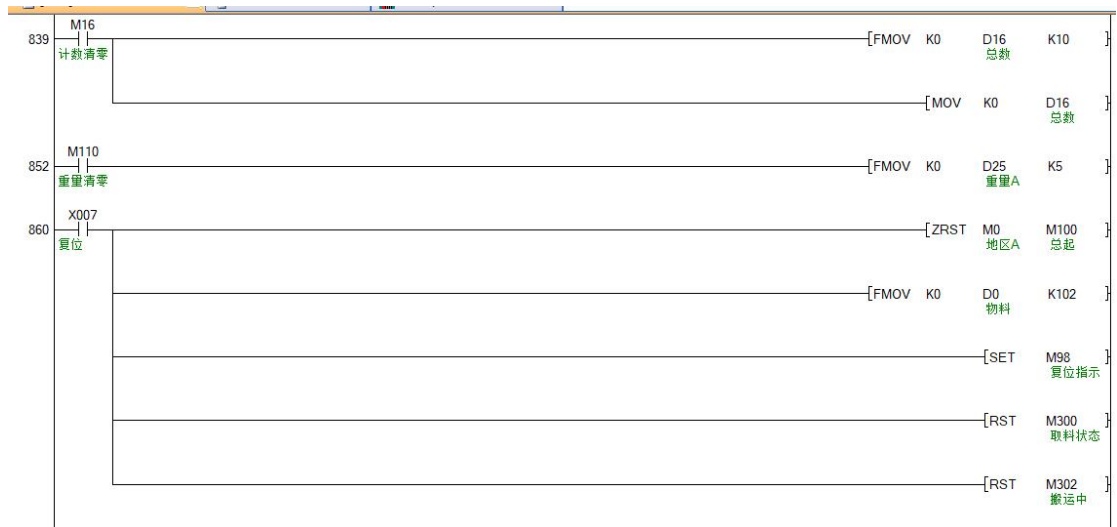


图 4-5 清零与班次切换程序

4.5 手动调试程序

4.5.1 点动控制逻辑

手动模式下支持点动传送带、机械手和各分拣气缸。点动动作建议采用按住有效、松开停止，增强安全性。

点动逻辑应优先满足维护安全，而非追求操作便捷。采用按住有效机制可在意外发生时快速停止动作，减少机械冲击和人身风险。

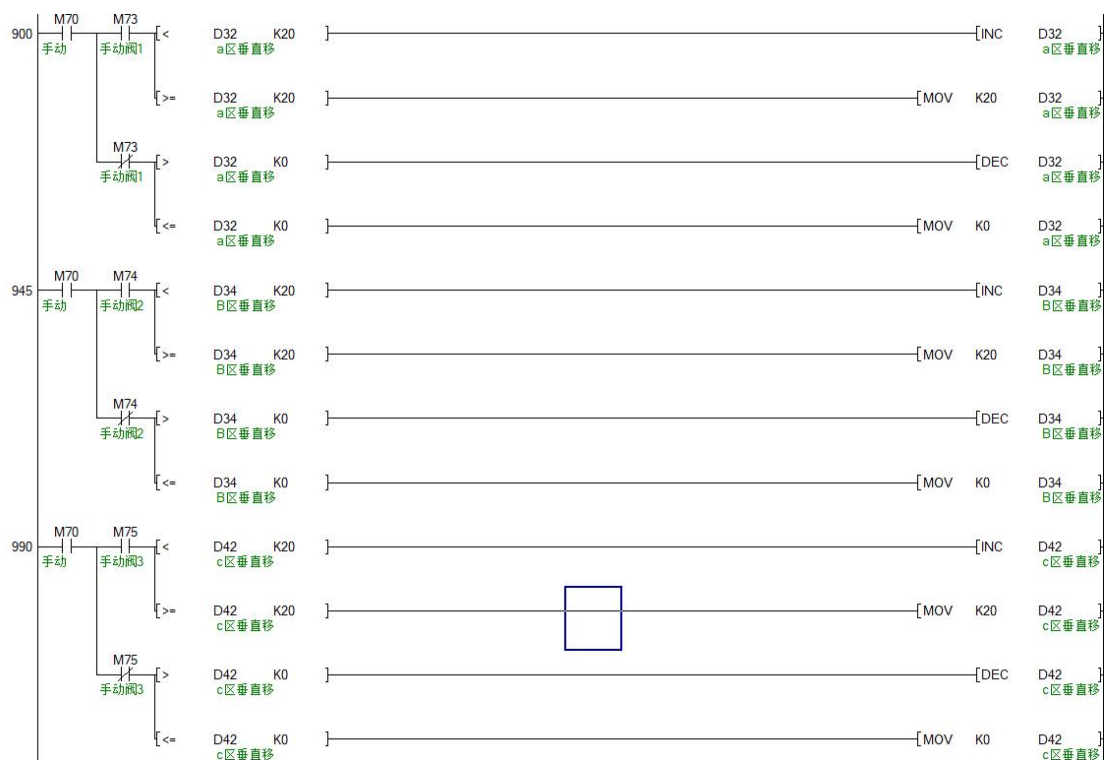


图 4-6 点动控制逻辑

4.5.2 手动互锁逻辑

点动指令之间保持互锁，同一时刻仅允许一个高风险动作执行，防止机械冲突。

手动互锁是调试安全的关键防线。即使在维护状态，系统仍应保持基本防碰撞约束，避免因误触发导致机构损坏。

4.6 故障处理与报警程序

4.6.1 故障分类与优先级

故障分为紧急故障和一般故障。急停、过载等属于紧急故障，优先级最高；传感器异常、动作超时等作为一般故障处理。

4.6.2 报警保持与复位逻辑

故障触发后设置报警保持位，故障解除且执行复位后才允许恢复运行，防止故障闪断造成误判断。

4.7 程序下载、联机监控与版本管理

4.7.1 程序下载流程

PLC 程序下载建议采用“离线编译检查—在线连接确认—停机窗口下载—关键功能复测”的流程。下载前需确认当前设备状态处于安全停机，避免带负载强制更新程序。下载后应优先验证急停、启停、模式切换等基础逻辑，再验证分拣动作和计数功能。该流程可有效降低“程序更新后现场异常”的风险。

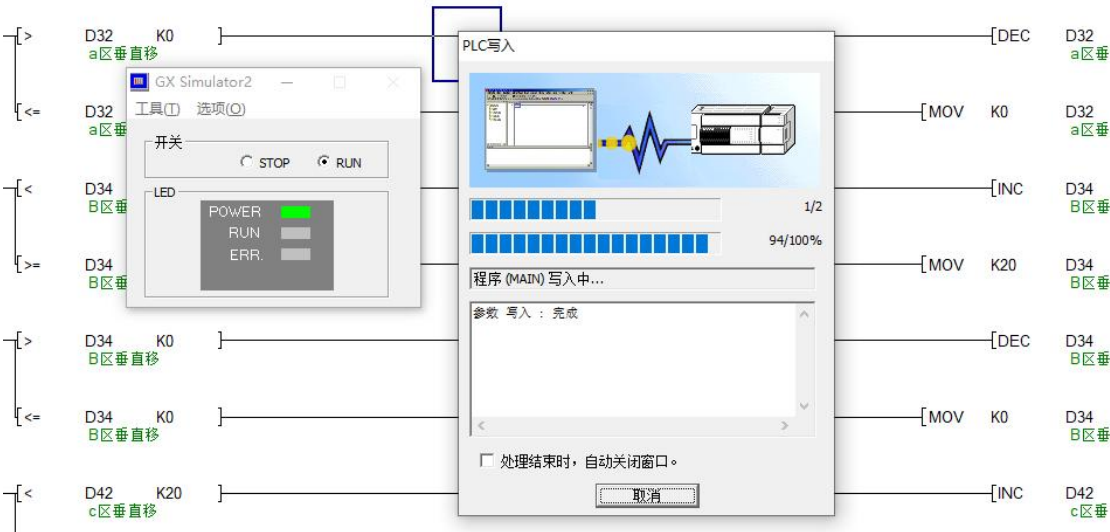


图 4-7 仿真模拟程序下载

4.7.2 联机监控要点

联机监控时应重点观察状态位跳转是否符合预期，例如：到位触发后判定位是否只置位一次、执行脉冲是否按时复位、故障位是否在复位后正确清除。建议在关键逻辑处设置中间监测位，便于快速识别“输入问题”还是“程序逻辑问题”。通过结构化监控而不是盲目看变量，可显著提升调试效率。

第 5 章 HMI 人机界面设计与实现

5.1 界面设计原则

5.1.1 信息分层原则

界面按“欢迎—监控—参数—调试—报警”分层，保证信息呈现清晰，减少操作认知负担。

5.1.2 颜色语义一致原则

运行状态用绿色，报警状态用红色，待机或提示状态用黄色或灰色。统一语义有助于快速判断系统状态。

5.1.3 安全交互原则

涉及风险的操作如模式切换、清零、复位，建议设置二次确认或密码权限，防止误触发。

5.2 欢迎界面设计

5.2.1 功能定位

欢迎界面用于系统入口展示，包含课题标题、进入主界面按钮、时间信息等。

欢迎界面的作用不仅是展示，也承担系统状态引导功能。建议在入口页提示当前模式或故障状态，减少用户误操作概率，提升交互连贯性。

5.2.2 交互逻辑

点击进入按钮后跳转主监控页；若系统存在故障锁定，可先弹出提示框引导用户复位。

交互逻辑应保证“先提示、后跳转”，避免用户进入页面后才发现无法操作。通过前置提示机制，可提高操作效率和系统可理解性。

5.2.3 视觉设计建议

背景宜简洁，按钮区域清晰，标题层次突出。过多动态元素会影响界面加载和可读性。

工业界面设计应优先可读性和稳定性，而非视觉炫酷。过度装饰会分散注意力并影响刷新性能，不利于现场快速判断。



图 5-1 欢迎界面图

5.3 主监控界面设计

5.3.1 页面布局

主监控页建议分为状态区、流程区、统计区和操作区。状态区显示运行模式与报警状态，流程区显示传送与执行动画，统计区显示分类数量和总数，操作区提供常用按钮。

5.3.2 变量绑定

需绑定运行状态位、故障位、执行位、计数寄存器等关键变量，保证显示与PLC 实时一致。

变量绑定应建立清单并进行一致性校验，避免“程序已改、界面未改”问题。对关键变量建议配置刷新优先级，确保状态显示及时准确。

5.3.3 动画联动

执行动作与动画应同步，便于现场人员通过画面快速判断逻辑是否正确。

动画联动的本质是状态可视化，不应脱离真实控制状态。建议所有动画由PLC 状态位驱动，而非本地定时动画，以保证信息可信。



图 5-2 主监控界面图

第 6 章 系统调试、测试与结果分析

6.1 调试流程设计

6.1.1 单元调试

先分别调试电源、PLC、传感器、阀组、HMI，验证单元功能正确后再联调。

单元调试的目标是把系统问题拆解为可控子问题。若跳过该步骤直接联调，故障定位复杂度会大幅上升，调试效率明显下降。

6.1.2 联机调试

按“输入采集→判定逻辑→执行输出→计数统计→报警处理”顺序逐步验证，形成调试记录。

联机调试应坚持“逐级放开”原则，即先验证基础链路，再验证复杂联锁，避免一次性放开全部功能导致问题叠加。

6.1.3 连续运行调试

在连续上料场景下观察节拍稳定性和误动作情况，记录异常并回溯程序逻辑。

连续运行测试可暴露单次测试难以发现的隐性问题，如热漂移、抖动累积和偶发通信拥塞。该阶段是系统工程化验证的关键环节。

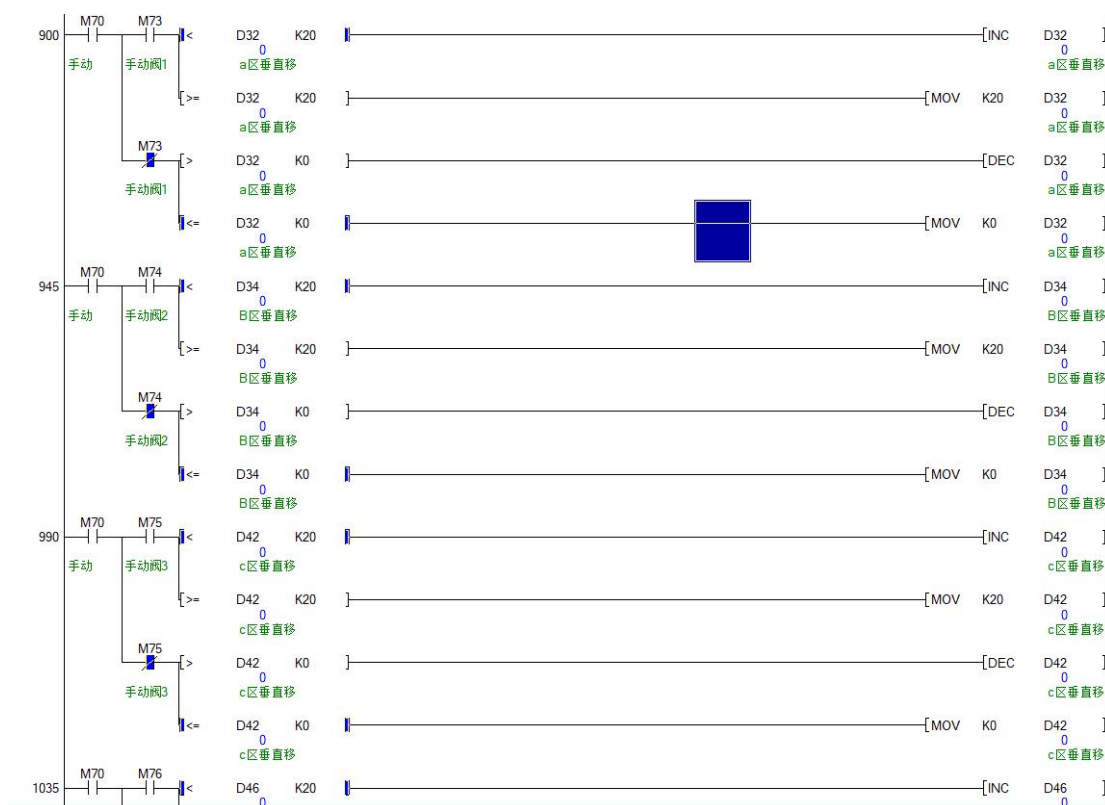


图 6-1 联机调试图

6.2 测试项目与方法

6.2.1 功能测试

验证启停、模式切换、自动分拣、手动点动、统计清零、故障复位等功能。

功能测试建议采用清单化方式逐项打勾，确保无遗漏。每项功能应至少在正常与异常两种工况下验证，提升测试覆盖率。

6.2.2 准确率测试

投放已知类别物料，统计分拣结果与理论值比对，计算分类准确率。

准确率测试应覆盖边界样本和随机混合样本，避免仅在理想样本下得到乐观结果。建议按批次统计并记录参数配置，便于横向对比。

6.2.3 稳定性测试

开展长时间运行测试，检查是否存在卡死、误触发、重复计数和通信异常。

稳定性测试的核心是观察系统在时间维度上的一致性。可通过设定固定采样窗口统计异常事件频率，判断系统是否存在退化趋势。

6.2.4 安全性测试

模拟急停、过载、气压异常、传感器断线等故障，验证联锁与报警是否有效。

安全性测试应遵循可控原则，先低风险后高风险。测试结束后需确认系统可安全恢复并重新进入可运行状态，确保防护机制完整。

6.3 测试结果分析

6.3.1 功能实现效果

系统能够完成预期控制流程，自动和手动功能切换正常，HMI 显示与 PLC 状态一致。

该结果说明控制链路闭环已建立，关键逻辑具备可执行性。后续优化应从精度和效率角度深入，而非再回到基础功能层面。

6.3.2 分拣准确性分析

在标准样本下分类准确率较高，误分主要集中在边界特征物料。通过阈值优化和姿态导向可进一步改善。

边界样本问题是实际工程中的常见挑战。针对该问题，建议采用多信号融合判定与阈值自适应策略，减少单一阈值决策带来的波动。

本章形成的测试方法、数据记录模板与故障闭环流程可直接复用于同类分拣系统项目。对教学场景，这些内容可作为实验评价依据；对工程场景，可作为项目交付验收和后续运维优化的过程文档基础。

总结与展望

本文围绕基于 PLC 的物料传送与分拣系统，完成了从需求分析、总体方案设计到硬件实现、程序开发、HMI 组态和联机调试的完整研究。研究表明，该系统能够稳定实现多类别物料识别分拣、自动/手动模式切换、分类计数统计和故障联锁保护，整体控制流程清晰、工程实现路径明确，能够满足教学实训和中小型自动化产线改造需求。

展望后续研究，可从“识别能力、控制性能、信息化协同”三方面持续提升：一是融合视觉识别与多传感数据提高复杂物料场景下的分类鲁棒性；二是构建速度闭环与参数自整定机制提升高节拍工况下的一致性与稳定性；三是扩展上位机和 MES 对接实现全流程数据追溯与预测性维护。通过上述优化，系统有望从基础自动化单元进一步升级为智能化、可持续迭代的工业分拣平台。

从工程方法角度看，本文的意义不仅在于完成了一套可运行的控制系统，更在于形成了可复用的实施范式：即“以工艺为中心的需求分解方法、以模块为中心的程序组织方法、以数据为中心的调试优化方法”。该范式对同类自动化课题具有通用参考价值。对于后续项目，开发者可在保留主干逻辑的基础上快速替换检测单元和执行单元，实现不同物料类别、不同节拍目标和不同管理需求下的快速迁移，显著缩短项目交付周期。

此外，随着工业现场对柔性生产与透明管理要求的不断提高，分拣系统的发展方向将逐步由“单站自动化”走向“多站协同化”，由“规则驱动”走向“规则与数据联合驱动”。在这一趋势下，PLC 仍将作为底层稳定控制核心，而视觉、边缘计算、工业网络和数字孪生等技术将作为增强层逐步融入。通过分层架构设计与渐进式升级路线，可在控制风险可控的前提下持续提升系统能力，为中小企业的智能化改造提供更具可行性的技术路径。

参考文献

- [1] 章景乐. 基于 PLC 的机械手分拣控制系统设计[J]. 中国设备工程, 2026, (04): 110-111.
- [2] 黄伟, 刘晶晶, 李雷. 基于 PLC 的物料分拣机械手控制系统设计[J]. 科技创新与生产力, 2026, 47(02): 88-91+95.
- [3] 杨静. 基于 PQFactory 平台的智能物料分拣工作站仿真设计[J]. 中国机械, 2026, (03): 124-127.
- [4] 刘华锋, 曾宝君, 许东霞, 等. 基于 NX MCD 的物料分拣装置的虚拟调试[J]. 工业控制计算机, 2025, 38(12): 76-78+81.
- [5] 关利民, 洪洋. 一种高效的物料分拣控制系统设计[J]. 仪器仪表与分析监测, 2025, (04): 49-52.
- [6] 淮文军, 刘树立, 高士伟, 等. 工业网络控制系统故障诊断与智能运维研究[J]. 电脑编程技巧与维护, 2025, (11): 173-176.
- [7] 凌旭, 邹冲, 戴俊良, 等. 基于 NX-MCD 的实训教学设备数字孪生系统设计[J]. 机械工程师, 2025, (10): 83-88.
- [8] 苑国伟. 基于汇川 PLC 的高效自动分拣系统设计与实现[J]. 模具制造, 2025, 25(10): 19-20+24.
- [9] 靳雷, 位大亮. 基于 TIA Portal 和 Factory IO 的 PLC 虚拟仿真平台[J]. 电工电气, 2025, (09): 42-45.
- [10] 杨岩岩. 虚拟调试在可编程逻辑控制器课程中的应用研究[J]. 内燃机与配件, 2025, (16): 129-131.
- [11] 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.
- [12] 黄玉洁. 基于产教融合理念的物料分拣实训装置的电气设计[J]. 家电维修, 2025, (07): 79-82.
- [13] 张柱, 刘海龙. 基于 ResNet 模型的智能物料分拣系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2025, (03): 20-23..
- [14] 周海舟. 基于 PLC 与图像处理技术的物料自动分拣模型研究[J]. 内燃机与配件, 2025, (10): 49-53.

[15]陈蒙,王陆林,鲍中运,等. Factory IO 和 TIA Portal 联合仿真在物联网控制教学中的应用探索[J].电脑知识与技术,2025,21(15):87-90.

[16]龙洁琪.基于学习进阶的项目教学法在中职《PLC 应用技术》课程教学中的应用研究[D].广西师范大学,2025.

[17]丁铎. 基于机器视觉的工业机器人物料分拣系统[J].电子制作,2025,33(08):37-40.

[18]张学辉. 基于 PLCSIM 与 FactoryIO 的物料分拣虚拟仿真系统设计[J].机械工程与自动化,2025,54(01):70-72.

[19]邸静妍. 基于 PLC 与机器视觉的物料分拣系统的设计[J].科技创新与生产力,2025,46(02):119-123.

[20]罗国荣,戚金凤. 基于数字孪生的物料分拣工作站的设计[J].北京工业职业技术学院学报,2025,24(01):12-17.

致谢

本论文的定稿，凝聚了无数师长、同窗与家人的智慧与温情，此刻落笔收尾，心中满是感激。首先，我要向我的指导老师致以最诚挚的谢意。从选题初期的迷茫困惑，到研究框架的反复推敲，再到具体实验与模型调试中的瓶颈突破，老师始终给予了我精准的指引与最耐心的包容。记得在处理复杂的数据可视化与代码调试时，是老师教会我如何理清逻辑、如何在细节中寻找突破，这种严谨求实的治学态度与深入浅出的指导方式，让我受益终身。同时，也要感谢实验室与班级的同学们，在无数个并肩奋斗的日子里，我们一起讨论技术难点、分享资源、互相打气，那些共同攻克难关的时刻，不仅是求学路上的战友情谊，更是我前行路上最温暖的支撑。

深谢我的家人，你们是我坚实的后盾。在整个求学与写作过程中，无论遇到多大的压力与困难，你们永远是那个默默付出、无条件理解与支持我的人。正是你们的包容与期盼，赋予了我克服困难的勇气与底气，让我能心无旁骛地投入到论文的研究与撰写中。回首这段漫长的旅程，每一次进步、每一份成果，都离不开身边人的陪伴与帮助。在此，我向所有关心、支持与帮助过我的师长、亲友与同窗致以最衷心的感谢。未来，我将怀揣这份感恩与所学，脚踏实地，继续前行，不负韶华。