

## 摘要

矿井提升机是煤矿生产系统中的关键运输装备，其运行安全直接关系到人员与设备安全。重力下放工况下，提升容器与配重系统在重力驱动下运行，系统具有惯性大、速度变化快、制动要求高、事故后果严重等特征。传统机械或继电器逻辑控制方式在复杂工况下存在调节精度不足、联锁逻辑僵化、故障诊断能力弱、运维可视化水平低等问题。为解决上述问题，本文基于西门子 S7-1214C PLC 及 SM1234 模拟量模块，结合液压制动执行机构、闸盘压力检测、储能罐压力检测、比例溢流阀调节、换向阀动作控制与人机界面监控需求，设计了一套矿井提升机重力下放制动控制系统。论文从系统需求分析、总体方案设计、硬件结构设计、I/O 分配与信号处理、控制策略与程序实现、HMI 组态、仿真调试与安全评估等方面展开。研究中构建了“模式管理-联锁保护-压力闭环-位置分段控制-故障闭锁”五层控制框架，实现正常模式与检修模式切换、罐笼上提/下放控制、正常停车与紧急制动模拟、减压阀/单向阀/节流阀/换向阀协同动作，并引入关键参数在线设定、趋势曲线显示与报警分级机制。测试结果表明，所设计系统可在重力下放典型工况中稳定完成减速、限速、到位制动过程，闸盘压力调节响应快，联锁逻辑完整，具备较好的工程可实施性和可维护性。本文研究可为矿山提升机电控改造、教学实训平台建设及智能矿山提升运输系统升级提供参考。

关键词：矿井提升机；重力下放；PLC；液压制动；联锁保护；HMI 监控；

## **Abstract**

The mine hoist is a critical transportation equipment in coal mine production systems, and its operational safety directly affects personnel and equipment safety. Under gravity lowering conditions, the hoisting container and counterweight are driven by gravity, resulting in large inertia, rapid speed variation, high braking demand, and severe consequences in case of failure. Traditional mechanical or relay-based control schemes often suffer from limited regulation precision, rigid interlock logic, weak fault diagnosis capability, and poor visualization for operation and maintenance. To address these issues, this paper proposes a PLC-based gravity lowering braking control system for mine hoists, using Siemens S7-1214C PLC and SM1234 analog module. The system integrates hydraulic braking actuators, brake disc pressure sensing, accumulator pressure sensing, proportional overflow valve regulation, directional valve control, and HMI-based monitoring. The study covers requirement analysis, overall scheme design, hardware architecture, I/O allocation and signal processing, control strategy and program implementation, HMI configuration, simulation debugging, and safety evaluation. A five-layer control framework of mode management, interlock protection, pressure closed-loop, position-segment control, and fault latching is established. It supports mode switching between normal and maintenance modes, cage raising/lowering operation, normal stop and emergency braking simulation, and coordinated control of pressure reducing valve, check valve, throttle valve, and directional valve. Online parameter setting, trend visualization, and alarm grading are also implemented. Test results indicate that the proposed system can reliably complete deceleration, speed limiting, and positioning braking in typical gravity lowering conditions, with fast pressure response, complete interlock logic, and good engineering applicability and maintainability. The research provides practical reference for mine hoist electrical retrofitting, educational training platforms, and intelligent mine transportation upgrades.

Key words: mine hoist; gravity lowering; PLC; hydraulic braking; interlock protection; HMI monitoring

## 目录

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 摘要 .....                       | 1  |
| Abstract .....                 | 2  |
| 第 1 章 绪论 .....                 | 9  |
| 1.1 研究背景与意义 .....              | 9  |
| 1.1.1 矿井提升系统在煤矿生产中的关键作用 .....  | 9  |
| 1.1.2 重力下放工况的控制难点 .....        | 9  |
| 1.1.3 PLC 在矿山提升控制中的应用价值 .....  | 9  |
| 1.2 国内外研究现状 .....              | 10 |
| 1.2.1 传统继电器及机械液压控制研究现状 .....   | 10 |
| 1.2.2 PLC 与变频/液压协同控制研究进展 ..... | 10 |
| 1.2.3 现有研究不足 .....             | 10 |
| 1.3 论文研究内容与技术路线 .....          | 11 |
| 1.3.1 研究目标 .....               | 11 |
| 1.3.2 主要研究内容 .....             | 11 |
| 1.3.3 技术路线 .....               | 11 |
| 1.4 论文结构安排 .....               | 12 |
| 1.4.1 各章节内容概述 .....            | 12 |
| 1.4.2 章节逻辑关系 .....             | 12 |
| 1.5 本章小结 .....                 | 13 |
| 1.5.1 研究问题归纳 .....             | 13 |
| 1.5.2 研究边界说明 .....             | 14 |
| 1.5.3 技术路线可行性说明 .....          | 14 |
| 第 2 章 系统工艺与控制需求分析 .....        | 15 |
| 2.1 提升机重力下放工艺过程分析 .....        | 15 |
| 2.1.1 提升系统组成与运行机理 .....        | 15 |
| 2.1.2 重力下放阶段划分 .....           | 15 |
| 2.1.3 制动系统工艺需求 .....           | 15 |
| 2.2 控制功能需求分析 .....             | 16 |

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 2.2.1 基本运行控制需求 .....       | 16 |
| 2.2.2 制动阀组控制需求 .....       | 16 |
| 2.2.3 模拟量采集与调节需求 .....     | 16 |
| 2.3 安全保护需求分析 .....         | 16 |
| 2.3.1 人身与设备安全需求 .....      | 16 |
| 2.3.2 超速与误动作防护需求 .....     | 16 |
| 2.3.3 故障诊断与闭锁需求 .....      | 16 |
| 2.4 人机交互与运维需求分析 .....      | 16 |
| 2.4.1 监控可视化需求 .....        | 16 |
| 2.4.2 参数设置需求 .....         | 17 |
| 2.5 控制指标量化与设计边界 .....      | 17 |
| 2.5.1 核心控制指标定义 .....       | 17 |
| 2.5.2 约束条件与冲突协调 .....      | 17 |
| 2.5.3 工程验收建议 .....         | 17 |
| 第 3 章 重力下放制动系统总体方案设计 ..... | 18 |
| 3.1 系统总体架构 .....           | 18 |
| 3.1.1 分层控制架构 .....         | 18 |
| 3.1.2 信号流与控制流设计 .....      | 18 |
| 3.1.3 系统运行状态定义 .....       | 18 |
| 3.2 控制模式与动作序列设计 .....      | 19 |
| 3.2.1 正常模式控制序列 .....       | 19 |
| 3.2.2 检修模式控制序列 .....       | 19 |
| 3.2.3 手动与自动协同原则 .....      | 20 |
| 3.3 重力下放制动策略设计 .....       | 20 |
| 3.3.1 分段控制策略 .....         | 20 |
| 3.3.2 压力-速度协同控制策略 .....    | 20 |
| 3.3.3 3.3.3 阀组联动策略 .....   | 20 |
| 3.4 安全联锁总体设计 .....         | 21 |
| 3.4.1 启停联锁设计 .....         | 21 |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 3.4.2 阀门互锁设计 .....      | 21 |
| 3.4.3 闸状态联锁设计 .....     | 21 |
| 3.5 控制时序与状态机细化设计 .....  | 22 |
| 3.5.1 状态机建模方法 .....     | 22 |
| 3.5.2 关键时序窗口定义 .....    | 22 |
| 3.5.3 状态回退与降级运行设计 ..... | 22 |
| 第 4 章 硬件系统设计 .....      | 23 |
| 4.1 PLC 与扩展模块选型设计 ..... | 23 |
| 4.1.1 PLC 主机选型 .....    | 23 |
| 4.1.2 模拟量模块选型 .....     | 23 |
| 4.1.3 扩展模块配置 .....      | 23 |
| 4.2 电源与主电路设计 .....      | 24 |
| 4.2.1 供电结构设计 .....      | 24 |
| 4.2.2 提升与油泵主回路设计 .....  | 24 |
| 4.2.3 回路保护设计 .....      | 24 |
| 4.3 I/O 分配与接线设计 .....   | 25 |
| 4.3.1 数字量输入分配 .....     | 25 |
| 4.3.2 数字量输出分配 .....     | 25 |
| 4.3.3 模拟量通道分配 .....     | 25 |
| 4.3.4 I/O 接线规范 .....    | 25 |
| 4.4 现场执行与检测元件设计 .....   | 27 |
| 4.4.1 液压执行元件 .....      | 27 |
| 4.4.2 压力检测元件 .....      | 27 |
| 4.4.3 位置与状态检测 .....     | 27 |
| 4.5 抗干扰与电气可靠性设计 .....   | 27 |
| 4.5.1 电磁兼容与布线策略 .....   | 27 |
| 4.5.2 接地与屏蔽设计要点 .....   | 28 |
| 4.5.3 备件与可维护性设计 .....   | 28 |
| 4.6 传感器与器件选型设计 .....    | 28 |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 4.6.1 选型原则与工程约束 .....   | 28 |
| 4.6.2 闸盘压力传感器选型 .....   | 28 |
| 4.6.3 储能罐压力传感器选型 .....  | 29 |
| 4.6.4 位置检测传感器选型 .....   | 30 |
| 4.6.5 速度检测方案选型 .....    | 30 |
| 4.6.6 电磁阀与比例阀选型 .....   | 31 |
| 4.6.7 具体型号建议与替代方案 ..... | 31 |
| 4.6.8 安装、标定与验收要点 .....  | 32 |
| 第 5 章 PLC 控制软件设计 .....  | 35 |
| 5.1 软件架构与编程规范 .....     | 35 |
| 5.1.1 程序组织结构 .....      | 35 |
| 5.1.2 变量命名规范 .....      | 35 |
| 5.1.3 程序扫描与实时性控制 .....  | 35 |
| 5.1.4 模块化调用顺序设计 .....   | 35 |
| 5.2 模式管理与基础控制逻辑设计 ..... | 36 |
| 5.2.1 系统启停逻辑 .....      | 36 |
| 5.2.3 罐笼上提/下放逻辑 .....   | 36 |
| 5.3 制动联锁控制逻辑设计 .....    | 37 |
| 5.3.1 闸打开与闸闭合控制逻辑 ..... | 37 |
| 5.3.2 正常停车控制逻辑 .....    | 37 |
| 5.3.3 紧急制动控制逻辑 .....    | 37 |
| 5.3.4 联锁逻辑真值表设计 .....   | 37 |
| 5.4 阀组协调控制逻辑设计 .....    | 39 |
| 5.4.1 减压阀与单向阀控制 .....   | 39 |
| 5.4.2 节流阀与换向阀控制 .....   | 39 |
| 5.4.3 比例阀调节控制 .....     | 39 |
| 5.5 模拟量处理与闭环调节设计 .....  | 40 |
| 5.5.1 采集量工程化转换 .....    | 40 |
| 5.5.2 比例阀输出量映射 .....    | 40 |

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 5.5.3 压力闭环控制策略 .....            | 40 |
| 5.5.4 闭环参数整定实例 .....            | 40 |
| 5.5.5 模拟量异常工况处理流程 .....         | 40 |
| 5.6 位置分段控制逻辑设计 .....            | 40 |
| 5.6.1 到位点控制逻辑 .....             | 41 |
| 5.6.2 限速点控制逻辑 .....             | 41 |
| 5.6.3 减速点控制逻辑 .....             | 41 |
| 5.7 报警与故障处理逻辑设计 .....           | 41 |
| 5.7.1 报警分级设计 .....              | 41 |
| 5.7.2 故障闭锁与复位 .....             | 42 |
| 5.7.3 故障事件记录 .....              | 42 |
| 5.7.4 故障链路时序分析 .....            | 42 |
| 5.7.5 常见故障案例逻辑复盘 .....          | 42 |
| 5.8 参数整定与软件鲁棒性设计 .....          | 43 |
| 5.8.1 参数整定流程 .....              | 43 |
| 5.8.2 防抖与滤波策略 .....             | 43 |
| 5.8.3 异常值处理与故障降级 .....          | 44 |
| 5.8.4 程序可测试性设计 .....            | 44 |
| 5.8.5 版本管理与变更控制 .....           | 44 |
| 5.8.6 在线调试注意事项 .....            | 44 |
| 第 6 章 第六章 HMI 监控画面与参数管理设计 ..... | 46 |
| 6.1 HMI 总体设计原则 .....            | 46 |
| 6.1.1 直观性原则 .....               | 46 |
| 6.1.2 安全性原则 .....               | 46 |
| 6.1.3 可维护性原则 .....              | 46 |
| 6.2 主画面功能设计 .....               | 46 |
| 6.2.1 位置与速度显示区 .....            | 46 |
| 6.2.2 系统控制按钮区 .....             | 46 |
| 6.2.3 阀组状态显示区 .....             | 46 |

|                        |    |
|------------------------|----|
| 6.3 参数设置与趋势监控设计 .....  | 47 |
| 6.3.1 参数设置页面设计 .....   | 47 |
| 6.3.2 参数生效与边界校验 .....  | 47 |
| 6.3.3 趋势曲线页面设计 .....   | 47 |
| 6.4 报警画面与操作权限设计 .....  | 47 |
| 6.4.1 报警显示机制 .....     | 47 |
| 6.4.2 操作权限管理 .....     | 47 |
| 6.4.3 交互优化设计 .....     | 48 |
| 6.5 数据归档与运维支持设计 .....  | 48 |
| 6.5.1 关键数据归档策略 .....   | 48 |
| 6.5.2 报警处置闭环管理 .....   | 48 |
| 6.5.3 运维培训与标准化文档 ..... | 48 |
| 第 7 章 系统调试与仿真验证 .....  | 49 |
| 7.1 调试方案与步骤 .....      | 49 |
| 7.1.1 单体调试 .....       | 49 |
| 7.1.2 联动调试 .....       | 49 |
| 7.1.3 保护调试 .....       | 49 |
| 7.2 典型工况仿真测试 .....     | 49 |
| 7.3 测试结果分析 .....       | 49 |
| 7.3.1 响应性能分析 .....     | 49 |
| 7.3.2 安全联锁效果分析 .....   | 50 |
| 第 8 章 结论与展望 .....      | 51 |
| 致谢 .....               | 52 |
| 参考文献 .....             | 53 |

# 第 1 章 绪论

## 1.1 研究背景与意义

### 1.1.1 矿井提升系统在煤矿生产中的关键作用

矿井提升系统承担人员升降、煤炭提升、材料运输、设备转运等核心任务，是井工矿山“生命线”设备之一。提升机运行可靠性直接影响矿井产能、人员安全和生产连续性。随着矿井开采深度增加，提升距离和负载波动增大，提升系统控制难度持续上升，传统控制方式难以满足高安全、高精度、高可视化运行要求。

### 1.1.2 重力下放工况的控制难点

重力下放是提升系统中最具风险的工况之一。其典型特征包括：一是系统存在较大势能释放过程，速度上升快；二是制动力与速度、位置、载荷耦合关系复杂；三是制动动作窗口窄，滞后会导致冲击或超速；四是现场环境电磁干扰、粉尘、温湿度变化对电控系统稳定性提出更高要求。因此，重力下放工况需要精细化的制动压力调节与严格的安全连锁。

### 1.1.3 PLC 在矿山提升控制中的应用价值

PLC 具有抗干扰能力强、逻辑实现清晰、维护方便、实时性高、扩展性好等优势。相较传统继电器控制，PLC 可将复杂联锁逻辑、模拟量调节、故障诊断、参数整定和人机交互统一于一个平台，显著提高系统可控性和可维护性。特别是在重力下放制动场景中，PLC 可实现“状态可视、过程可控、故障可追、参数可调”的工程目标。

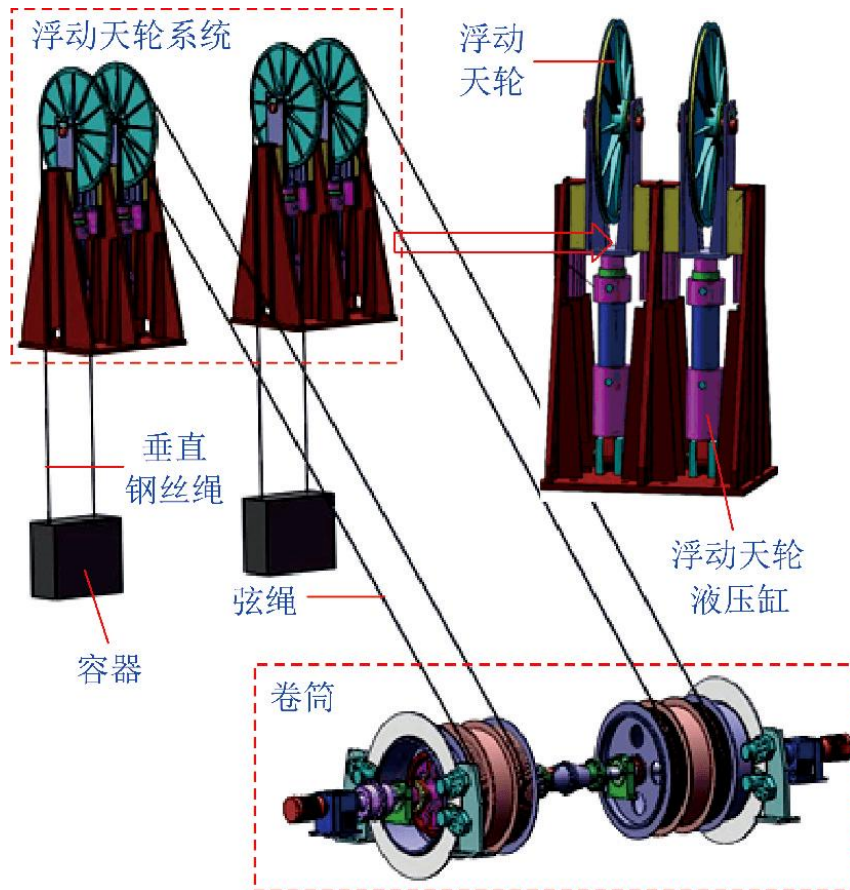


图 1-1 矿井提升机系统结构图

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 传统继电器及机械液压控制研究现状

早期矿井提升机制动系统以液压站+继电器逻辑为主，其优点是结构直观、基础可靠，但存在逻辑固化、参数修改困难、状态反馈不足等问题。在重力下放多工况切换时，继电器系统难以精确匹配不同阶段制动力需求，常依赖经验调节，调试周期长。

### 1.2.2 PLC 与变频/液压协同控制研究进展

近年来，研究重点逐步转向 PLC 与液压比例控制、速度反馈控制、多级安全联锁相结合的技术路线。通过 AI 采集闸盘压力、位置、速度等变量，配合 AO 输出比例阀调节，可实现更加平滑和可控的制动过程。与此同时，HMI 可视化技术提升了运行监视和故障定位效率。

### 1.2.3 现有研究不足

现有研究中普遍存在以下问题：其一，重视理论控制算法，忽视现场可实施性；其二，联锁逻辑描述不完整，缺乏“动作-反馈-闭锁-复位”的完整链路；其三，

HMI 画面停留在“状态显示”，缺乏参数管理和趋势分析；其四，针对教学实训或中小矿井的可复制方案较少。本文立足工程资料，强调可落地、可复现、可维护。

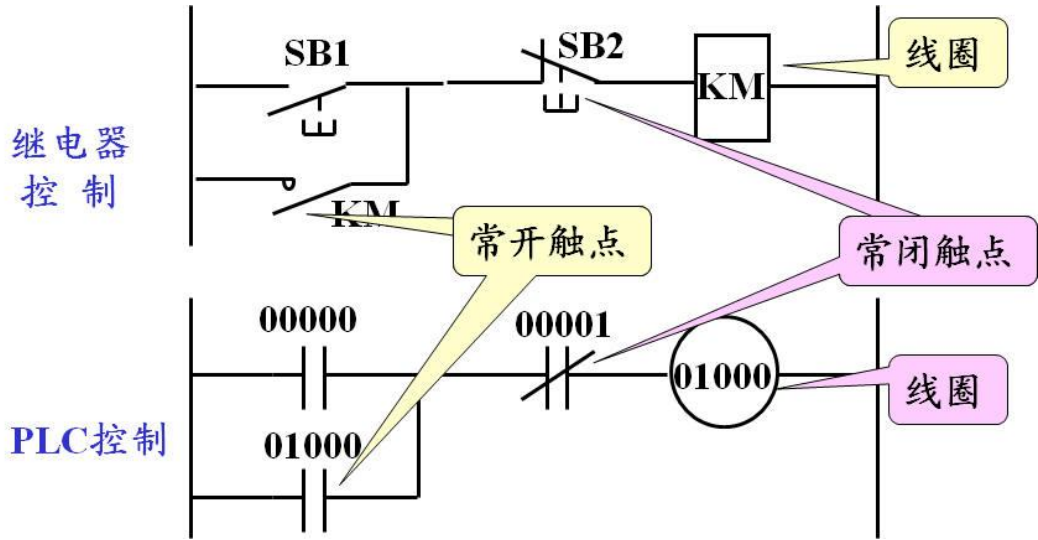


图 1-2 继电器控制与 PLC 控制对比图

### 1.3 论文研究内容与技术路线

#### 1.3.1 研究目标

本文目标是构建一套基于 PLC 的矿井提升机重力下放制动系统，实现以下功能：

- 1) 完成提升机重力下放制动过程的自动化控制；
- 2) 实现制动关键阀组协调动作与压力调节；
- 3) 建立完备的安全联锁与故障闭锁机制；
- 4) 实现 HMI 可视化监控、参数设置与趋势记录；
- 5) 形成可用于工程应用与教学演示的完整设计方案。

#### 1.3.2 主要研究内容

围绕目标，本文开展系统工艺分析、硬件选型、I/O 分配、控制程序设计、HMI 组态、仿真调试与安全评估等工作。重点关注重力下放阶段的减速点、限速点、到位点控制策略与闸盘压力闭环调节。

#### 1.3.3 技术路线

本文采用“需求分析-方案设计-硬件构建-软件实现-界面组态-测试验证-优化总结”的闭环技术路线，突出工程完整性和可操作性。

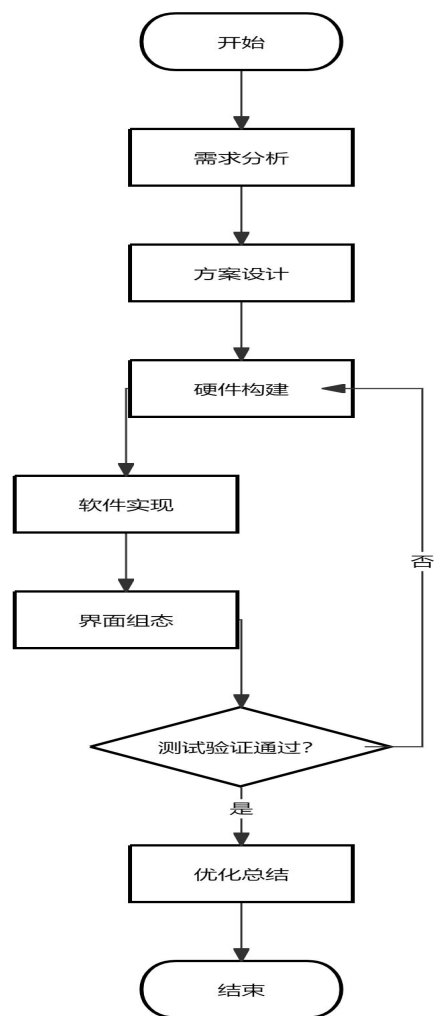


图 1-3 论文技术路线图

## 1.4 论文结构安排

### 1.4.1 各章节内容概述

第一章为绪论；第二章分析工艺与控制需求；第三章给出总体方案；第四章完成硬件设计；第五章展开 PLC 程序设计；第六章阐述 HMI 设计；第七章给出调试与验证；第八章分析系统安全性与工程化价值；第九章总结与展望。

### 1.4.2 章节逻辑关系

第二、三、四章回答“系统怎么搭建”；第五、六章回答“系统怎么控制与管理”；第七、八章回答“系统效果如何及是否可推广”；第九章给出研究结论。

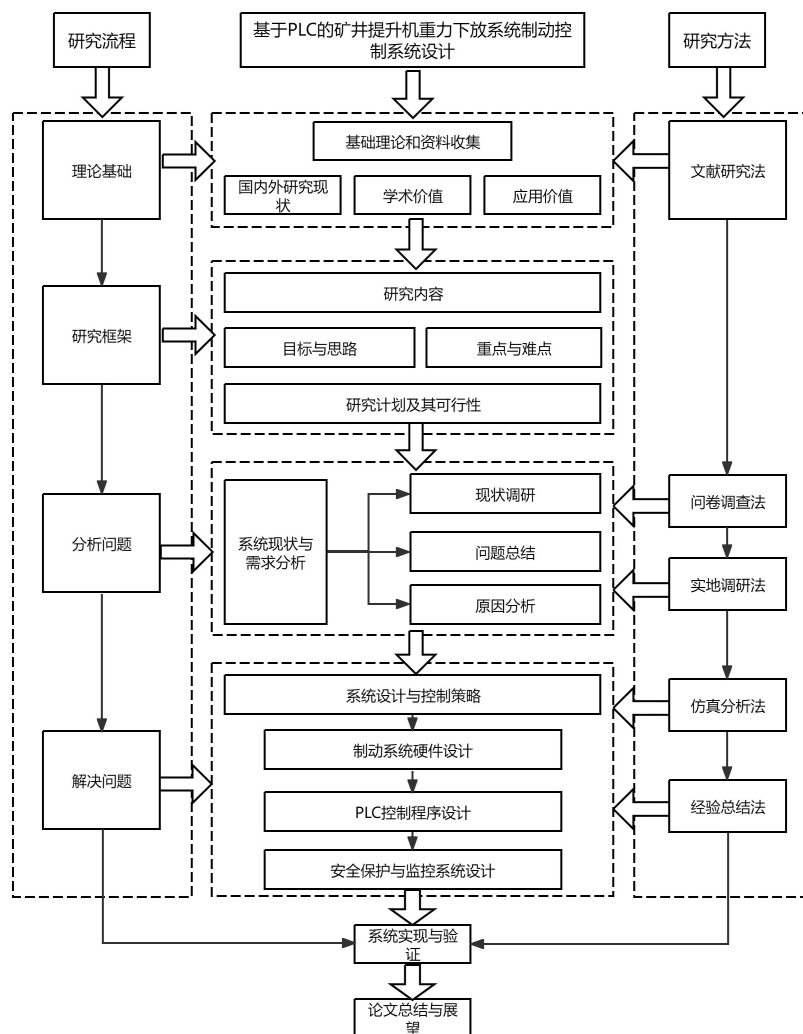


图 1-4 论文结构框架图

## 1.5 本章小结

### 1.5.1 研究问题归纳

本章围绕矿井提升机重力下放制动控制的工程痛点进行了归纳。与一般工业传动系统相比，矿井提升系统具有更高的安全等级要求与更严苛的事故后果约束，控制系统不仅要“能运行”，更要“可解释、可追溯、可验证”。传统硬接线控制在简单工况下具有一定可靠性，但在多状态切换、连续调压、故障分级和在线参数管理方面存在先天不足。本文提出以 PLC 为核心的系统设计路线，本质上是把经验控制流程转化为可程序化、可维护的工业控制逻辑，降低系统对个人经验的依赖。

### 1.5.2 研究边界说明

为保证论文的工程实用性，本文将研究边界限定在“重力下放制动控制”主线，不涉及提升机机械本体结构优化和井筒结构设计；控制层面重点研究阀组联动、压力调节、位置分段控制与联锁保护，不展开复杂非线性控制算法的大规模数值求解；实现平台采用 S7-1214C 及扩展模块，强调可在教学与中小型工程场景中落地。该边界设定有助于形成完整闭环：需求可定义、方案可实现、结果可验证、经验可复用。

### 1.5.3 技术路线可行性说明

从实施路径看，本文方案具备三重可行性：第一，硬件可行，所需 PLC、模拟量模块、液压阀组与 HMI 均为成熟工业产品，供应链稳定；第二，软件可行，TIA Portal 支持梯形图与数据块管理，适合联锁逻辑和参数化设计；第三，运维可行，现场人员可通过画面和报警信息快速定位问题，不必直接修改底层程序。综合来看，本文路线既能满足本科毕业设计对完整性的要求，也符合工程现场“先稳后优、先安全后效率”的实施原则。

## 第 2 章 系统工艺与控制需求分析

### 2.1 提升机重力下放工艺过程分析

#### 2.1.1 提升系统组成与运行机理

矿井提升系统一般由提升电机、卷筒或摩擦轮、钢丝绳、罐笼、配重、制动系统、液压站和电控系统组成。重力下放时，罐笼与配重在载荷差作用下发生位移，制动系统通过调节闸盘压力实现速度控制和停车控制，防止超速和冲击。

#### 2.1.2 重力下放阶段划分

从控制角度，重力下放可分为启动释放阶段、稳定下放阶段、减速控制阶段、限速控制阶段、到位停车阶段。不同阶段对阀组动作、压力调节和联锁条件有不同要求，控制策略应分段设计。

#### 2.1.3 制动系统工艺需求

制动系统需满足：快速响应、可调制动力、动作可靠、具备失效安全特性。液压执行元件包含减压阀、单向阀、节流阀、换向阀、比例溢流阀等，PLC 控制需实现阀组顺序与互锁，防止误动作。

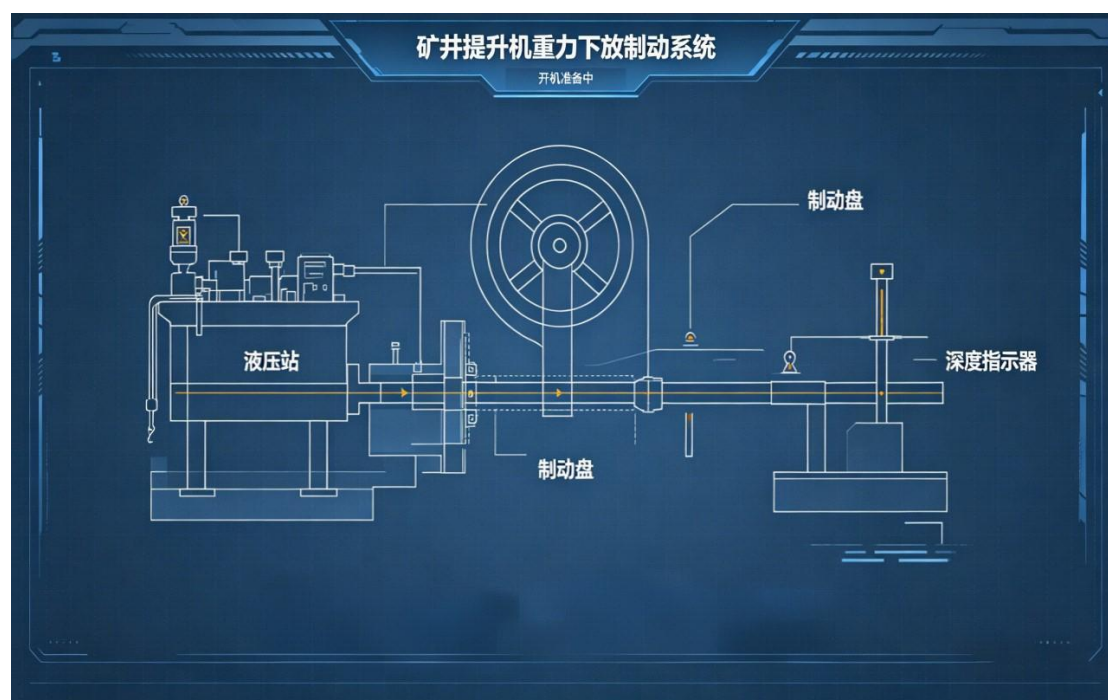


图 2-1 重力下放制动工艺过程示意图

## 2.2 控制功能需求分析

### 2.2.1 基本运行控制需求

系统应支持系统启动、系统停止、油泵启动、油泵停止、罐笼上提、罐笼下放等基本操作，满足正常模式和检修模式双模式运行要求。模式切换应有状态指示与权限管理。

### 2.2.2 制动阀组控制需求

减压阀、单向阀、节流阀、换向阀和比例阀需要按工艺逻辑协同动作。其中比例阀用于压力连续调节，换向阀用于流向切换，节流阀用于速度细调，单向阀用于防逆流，减压阀用于基础压力管理。

### 2.2.3 模拟量采集与调节需求

系统需要实时采集闸盘压力、储能罐压力等模拟量信号，并通过模拟量输出调节比例溢流阀开度，实现压力闭环调节。采样值需经过量程转换、滤波、限幅和越限判断。

## 2.3 安全保护需求分析

### 2.3.1 人身与设备安全需求

必须配置急停回路，急停触发后立即切断高风险输出。系统需具备闸打开/闸闭合状态识别，防止“指令与机械状态不一致”导致危险动作。

### 2.3.2 超速与误动作防护需求

在重力下放中，限速点和减速点控制至关重要。系统应结合位置变量设置减速点、限速点、到位点触发逻辑，防止冲顶、蹲底或超速。

### 2.3.3 故障诊断与闭锁需求

对关键故障压力越限、阀动作失败、油泵异常、传感器异常等应分级报警。严重故障应触发闭锁，要求人工确认后复位，避免自动带病重启。

## 2.4 人机交互与运维需求分析

### 2.4.1 监控可视化需求

HMI 需直观显示罐笼位置、配重位置、当前速度、各阀门状态、油泵状态、闸状态、模式状态、运行指示等信息，便于值守人员快速判断系统状态。

### 2.4.2 参数设置需求

需要在线设置压力上限、恒减速压力点、储能压力上限、正常最高速度、检修最高速度、减速点位置、限速点位置等参数，支持分权限管理。

## 2.5 控制指标量化与设计边界

### 2.5.1 核心控制指标定义

为了使系统调试和验收具有客观依据，需将“运行稳定”“响应及时”“制动可靠”等描述转化为可量化指标。本文建议以下指标作为工程评价基线：其一，模式切换响应时间，即操作命令发出至对应状态位稳定建立的时间；其二，阀组动作确认时间，即输出动作后反馈信号到位所需时间；其三，压力跟踪误差，即压力设定值与实测值偏差的稳态范围；其四，到位停车偏差，即目标停车位置与实际停车位置的误差；其五，联锁误触发率，即无故障工况下联锁误动作次数占比。通过指标化定义，系统优化不再停留在主观感受层面，而可形成可重复比较的数据闭环。

### 2.5.2 约束条件与冲突协调

矿井提升机制动控制存在天然的多目标冲突：制动越快越安全，但冲击越大；速度越稳越舒适，但响应可能变慢；联锁越严格越安全，但系统可用性可能下降。为此，控制策略需在“安全性、平稳性、可用性”之间进行约束协调。本文采用“优先级分层”思路处理冲突：一级目标为人员与设备安全，任何情况下不可让渡；二级目标为工艺稳定与速度控制；三级目标为效率与操作便捷性。该优先级可直接映射到 PLC 程序中，体现为急停和严重故障优先级最高、再到模式控制、最后到优化调节逻辑。

### 2.5.3 工程验收建议

结合矿山现场实践，建议将系统验收分为静态验收和动态验收两部分。静态验收重点检查 I/O 映射、联锁条件、报警文本、权限配置、参数边界；动态验收重点检查典型工况响应、紧急制动有效性、趋势记录完整性和故障复位流程。验收过程中应形成标准化记录，包括测试工况、触发条件、期望结果、实际结果和处理意见，为后续维护与升级提供依据。

## 第 3 章 重力下放制动系统总体方案设计

### 3.1 系统总体架构

#### 3.1.1 分层控制架构

系统采用四层架构：现场执行层液压站与阀组、采集层开关量与模拟量采集、控制层 PLC 逻辑计算与输出、监控层 HMI 显示与操作。该架构兼顾实时控制与操作可视化。

#### 3.1.2 信号流与控制流设计

现场信号经 DI/AI 进入 PLC，经逻辑判断与算法处理后由 DO/AO 输出控制执行元件，同时关键变量映射至 HMI。控制流遵循“采集-判定-执行-反馈-修正”闭环原则。

#### 3.1.3 系统运行状态定义

系统定义待机、运行、检修、报警、闭锁五类状态。不同状态下操作权限和输出允许条件不同，确保状态管理清晰有序。

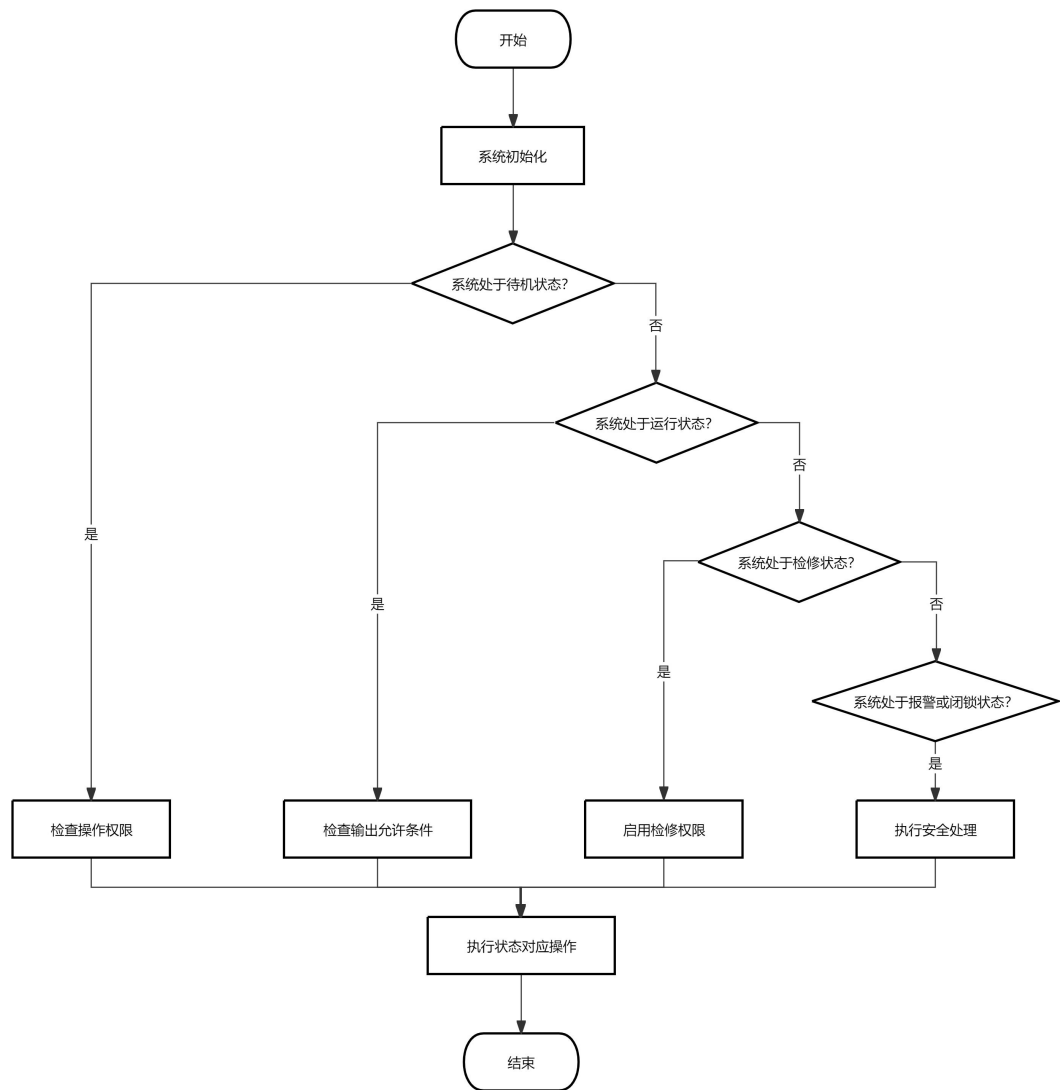


图 3-1 系统总体架构图

## 3.2 控制模式与动作序列设计

### 3.2.1 正常模式控制序列

正常模式下，系统按标准工艺执行：启动液压站、检测压力建立、允许释放制动、进入下放控制、触发减速点、进入限速区、到位停车并闸闭合。每步均设置前置条件与反馈确认。

### 3.2.2 检修模式控制序列

检修模式用于低速、低风险调试，允许人工点动控制部分动作。系统限制最大速度并保留关键联锁，防止检修操作越界。

### 3.2.3 手动与自动协同原则

自动逻辑优先保障安全；手动操作在允许窗口内生效。若手动命令与安全联锁冲突，系统优先执行安全策略并报警提示。

## 3.3 重力下放制动策略设计

### 3.3.1 分段控制策略

基于位置分段实现制动控制：在自由下放区维持目标压力；进入减速区提升制动力；进入限速区执行速度约束；到位区快速稳定停车。分段策略降低单一控制律在全域内失效风险。

### 3.3.2 压力-速度协同控制策略

通过比例阀调节闸盘压力，使制动力与速度变化匹配。速度偏高时提高压力给定，速度偏低时降低压力给定，避免制动过冲与振荡。

### 3.3.3 3.3.3 阀组联动策略

换向阀确定油路方向，减压阀设定基础压力，节流阀微调流量，单向阀防逆流，比例阀精调制动力。PLC 程序将各阀动作映射为有序联动网络。

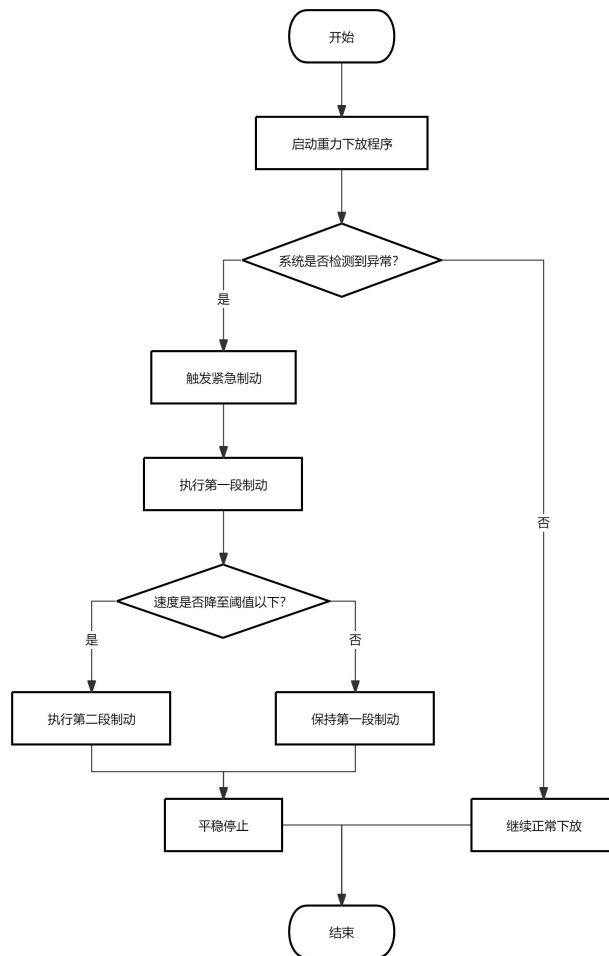


图 3-2 重力下放分段制动流程图

## 3.4 安全联锁总体设计

### 3.4.1 启停联锁设计

系统启动需满足急停复位、关键故障清除、压力建立等条件。系统停止应分正常停车与紧急制动两类逻辑，分别对应不同减压和抱闸流程。

### 3.4.2 阀门互锁设计

互斥阀门禁止同时动作，关键阀动作需前后状态校验，防止油路冲突。换向阀正向/反向命令采用互锁并附带状态确认。

### 3.4.3 闸状态联锁设计

闸打开与闸闭合反馈必须可信。若命令打开但闭合反馈持续存在，视为动作失败并触发报警；若命令闭合但打开反馈仍在，也应闭锁。

## 3.5 控制时序与状态机细化设计

### 3.5.1 状态机建模方法

为避免多网络并行执行导致逻辑冲突，本文将系统运行过程抽象为状态机模型。状态集合可定义为：待机、准备、下放运行、减速运行、限速运行、到位停车、故障闭锁。每个状态均定义进入条件、保持条件和退出条件，并设置非法状态跳转保护。状态机实现后，程序逻辑不再是分散的“条件触发”，而是具备明确流程边界的“阶段执行”，可显著降低调试复杂度。

### 3.5.2 关键时序窗口定义

液压阀组动作与机械响应存在时间差，若不设置时序窗口，可能出现“命令已发出但反馈未到位”而被误判为故障。本文建议在关键动作链路引入时序窗口：油泵启动后压力建立窗口、换向阀切换稳定窗口、闸打开确认窗口、闸闭合确认窗口。窗口内允许短时过渡，超出窗口仍未满足条件则置故障。该方法能够兼顾动作容忍度与故障检测敏感性，减少误报警。

### 3.5.3 状态回退与降级运行设计

在工程场景中，系统并非总在理想条件下运行。若某个非关键子功能异常，立即全停虽安全但会降低可用性。因此可引入“受限降级”机制：在不违反一级安全目标的前提下，屏蔽异常子功能，保留基础安全运行能力。例如某非关键指示通道异常时，不影响主制动链路运行；但若涉及闸状态反馈异常，则必须进入闭锁。通过分级回退策略，可实现安全与可用性的平衡。

# 第 4 章 硬件系统设计

## 4.1 PLC 与扩展模块选型设计

### 4.1.1 PLC 主机选型

根据资料，系统选用西门子 S7-1214C PLC。该型号具备足够数字 I/O 容量和处理能力，可满足本系统逻辑控制需求，并兼容 TIA Portal 开发环境。

### 4.1.2 模拟量模块选型

系统采用 SM1234 模拟量模块，实现压力采集与比例阀输出。SM1234 支持 AI/AO 混合，便于在同一模块完成“采集+调节”闭环通道部署。

### 4.1.3 扩展模块配置

针对按钮、模式、阀状态和指示输出需求，系统增加 SM1223 混合扩展模块，提升 DI/DO 点位容量，保证后期拓展余量。

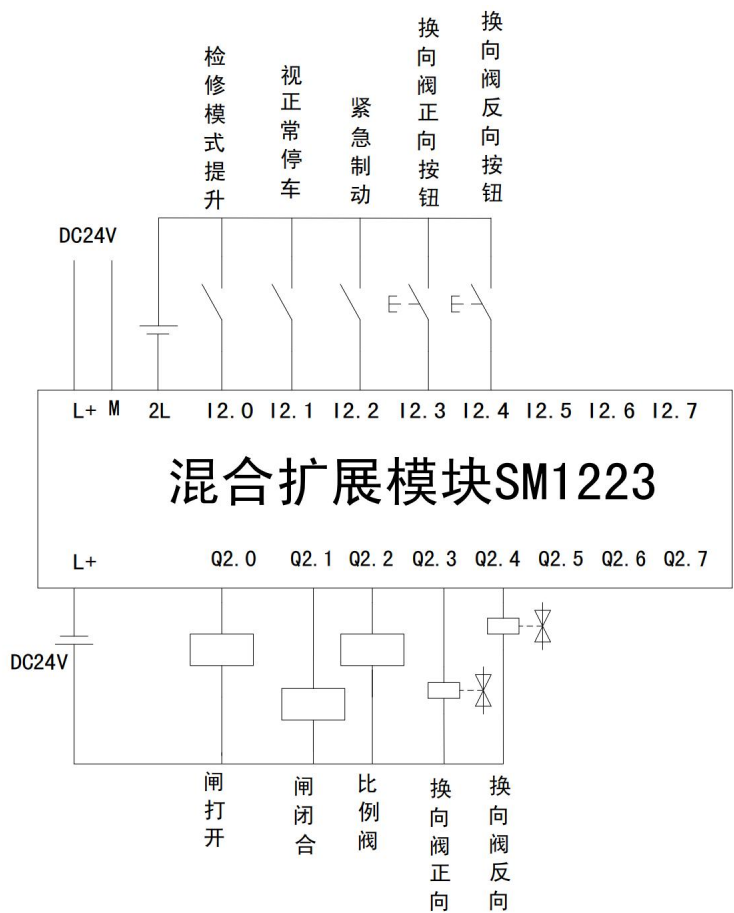


图 4-1 扩展模块图

## 4.2 电源与主电路设计

### 4.2.1 供电结构设计

系统采用 AC220V 供电，经 DC24V 电源模块为 PLC、传感器、继电器线圈、按钮回路供电。强弱电分离布线，提升抗干扰能力。

### 4.2.2 提升与油泵主回路设计

主电路含提升电机与油泵电机控制回路，配置接触器、熔断器、热继电器等保护元件。油泵提供液压动力，是制动系统稳定运行基础。

### 4.2.3 回路保护设计

主回路与控制回路均应设置短路、过载和失压保护，关键回路可增加中间继电器隔离，降低 PLC 输出受冲击风险。

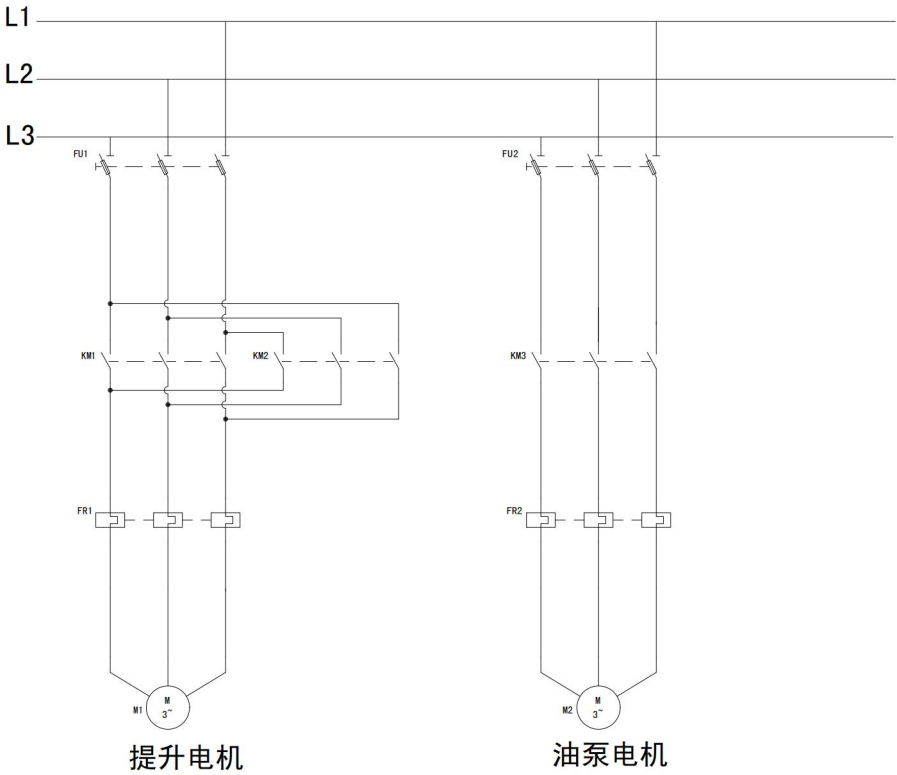


图 4-2 主电路图

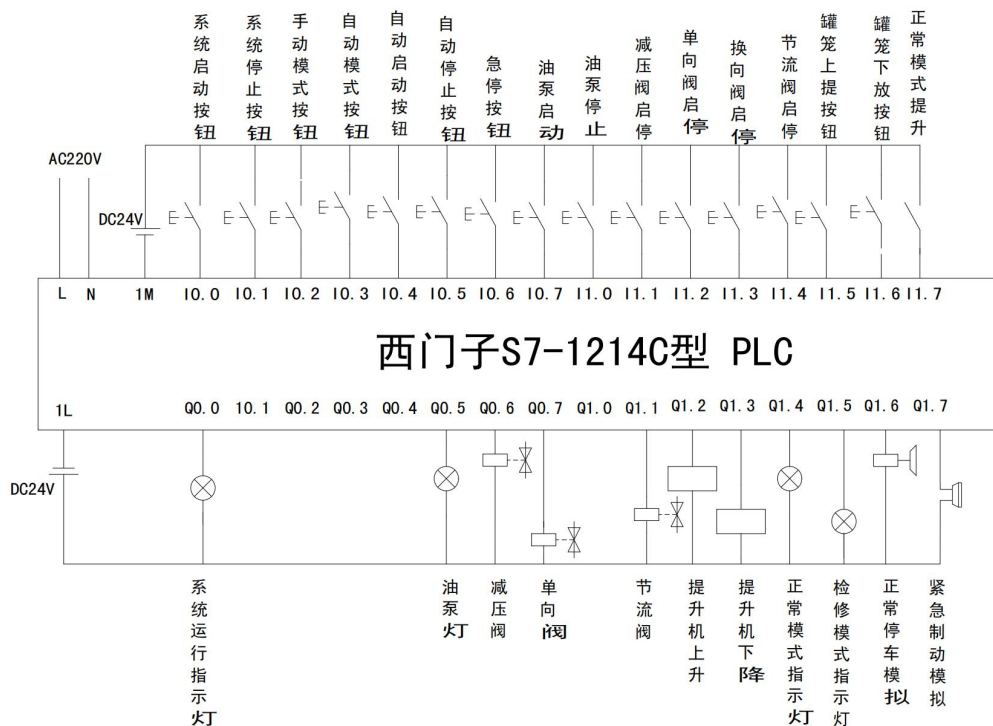


图 4-3 控制电路图

## 4.3 I/O 分配与接线设计

### 4.3.1 数字量输入分配

输入信号包括系统启动按钮、系统停止按钮、手动模式按钮、自动模式按钮、自动启动按钮、自动停止按钮、急停按钮、罐笼上提按钮、罐笼下放按钮、正常停车模拟、紧急制动模拟、换向阀正反向按钮、闸状态反馈等。

### 4.3.2 数字量输出分配

输出信号包括系统运行指示灯、油泵启停、减压阀启停、单向阀启停、换向阀启停、节流阀启停、提升机上升/下降、模式指示灯、闸状态指示、阀状态指示等。

### 4.3.3 模拟量通道分配

AI 通道用于闸盘压力、储能罐压力采集；AO 通道用于比例溢流阀调节输出。需明确量程映射关系，例如 0-10V 或 4-20mA 对应工程量范围。

### 4.3.4 I/O 接线规范

模拟量线采用屏蔽双绞线，单端接地；数字量线与动力线分槽；端子标识规范，便于维护。关键回路应在图纸中标注线号和功能。

表 4-1 I/O 清单

| 序<br>号 | 输入名称        | 输入地<br>址 | 输出名称        | 输出地<br>址 |
|--------|-------------|----------|-------------|----------|
| 1      | 系统启动按钮      | I0.0     | 系统运行指示<br>灯 | Q0.0     |
| 2      | 系统停止按钮      | I0.1     | 油泵          | Q0.5     |
| 3      | 手动模式按钮      | I0.2     | 减压阀         | Q0.6     |
| 4      | 自动模式按钮      | I0.3     | 单向阀         | Q0.7     |
| 5      | 自动启动按钮      | I0.4     | 节流阀         | Q1.1     |
| 6      | 自动停止按钮      | I0.5     | 提升机上升       | Q1.2     |
| 7      | 急停按钮        | I0.6     | 提升机下降       | Q1.3     |
| 8      | 油泵启动        | I0.7     | 正常模式指示<br>灯 | Q1.4     |
| 9      | 油泵停止        | I1.0     | 检修模式指示<br>灯 | Q1.5     |
| 10     | 减压阀启停       | I1.1     | 正常停车模拟      | Q1.6     |
| 11     | 单向阀启停       | I1.2     | 紧急制动模拟      | Q1.7     |
| 12     | 换向阀启停       | I1.3     | 闸打开         | Q2.0     |
| 13     | 节流阀启停       | I1.4     | 闸闭合         | Q2.1     |
| 14     | 罐笼上提按钮      | I1.5     | 比例阀         | Q2.2     |
| 15     | 罐笼下放按钮      | I1.6     | 换向阀正向       | Q2.3     |
| 16     | 正常模式提升      | I1.7     | 换向阀反向       | Q2.4     |
| 17     | 检修模式提升      | I2.0     | 比例溢流阀       | QW64     |
| 18     | 正常停车        | I2.1     |             |          |
| 19     | 紧急制动        | I2.2     |             |          |
| 20     | 换向阀正向按<br>钮 | I2.3     |             |          |
| 21     | 换向阀反向按<br>钮 | I2.4     |             |          |

|    |       |      |
|----|-------|------|
| 22 | 闸盘压力  | IW64 |
| 23 | 储能罐压力 | IW66 |



图 4-4 模拟量模块

## 4.4 现场执行与检测元件设计

### 4.4.1 液压执行元件

液压执行元件包括油泵、减压阀、单向阀、节流阀、换向阀、比例溢流阀。各执行元件动作特性不同，控制逻辑应区分“开关动作”和“连续调节”。

### 4.4.2 压力检测元件

闸盘压力和储能罐压力是制动控制核心反馈量。传感器精度与响应速度将直接影响闭环效果，需定期标定。

### 4.4.3 位置与状态检测

罐笼位置、配重位置、闸开闭状态、模式状态等检测量用于分段控制和联锁判断。应保证采集稳定，避免抖动误判。

## 4.5 抗干扰与电气可靠性设计

### 4.5.1 电磁兼容与布线策略

矿山现场电磁环境复杂，提升电机、油泵电机和接触器切换会产生较强干扰。

为保证控制系统稳定，应从源头抑制、路径隔离、终端防护三方面设计：源头抑制可通过加装浪涌吸收与抑制模块降低干扰峰值；路径隔离可通过强弱电分槽、模拟量独立走线、屏蔽线单端接地减少耦合；终端防护可通过隔离模块、滤波模块和中间继电器保护 PLC 输入输出端。该策略在提升系统中可显著降低误触发率。

#### 4.5.2 接地与屏蔽设计要点

接地系统应执行“单点参考、多点保护”的原则。控制系统参考地应保持清洁，避免与大电流回路形成环流；屏蔽层应在控制柜端单端接地，防止双端接地引入共模干扰；模拟量传感器建议采用隔离供电并就近接地。对于长期运行系统，建议定期检查接地电阻和端子压接状态，防止因振动、潮湿引起接触不良。

#### 4.5.3 备件与可维护性设计

硬件设计阶段应同步考虑维护便利性。建议对关键元件建立备件清单，包括 PLC 模块、电源模块、继电器、传感器和阀线圈；对端子排和线号进行标准化标识；在控制柜内预留合理维护空间和测试端子。这样可在故障发生时快速替换，缩短停机时间，提高系统生命周期可靠性。

### 4.6 传感器与器件选型设计

#### 4.6.1 选型原则与工程约束

本系统传感器选型遵循“量程覆盖、精度满足、接口兼容、环境适应、维护方便”五项原则。矿井现场存在粉尘、潮湿、振动和电磁干扰，传感器应具备较高防护等级和抗干扰能力；输出信号应优先选择 PLC 易接入的标准工业信号 4-20mA、0-10V、开关量 PNP/NPN；关键测点应保留校准与更换空间。考虑重力下放制动控制对实时性要求，压力与位置类信号的响应时间应控制在可接受范围内，避免因测量滞后导致控制超调。

#### 4.6.2 闸盘压力传感器选型

闸盘压力是制动控制的核心反馈变量，建议采用工业级压力变送器，量程可按系统实际压力等级选取例如 0-10MPa 或 0-16MPa，输出优先采用 4-20mA，便于长距离传输并降低干扰影响。精度建议不低于 0.5%FS，防护等级建议 IP65 及以上。安装时应尽量靠近测压点，增加缓冲接头减少压力脉动冲击，并在程序侧设置量程上下限与异常突变检测。



图 4-5 工业压力变送器 4-20mA IP65

#### 4.6.3 储能罐压力传感器选型

储能罐压力用于判断液压储能状态和系统可用性，建议采用与闸盘压力同等级别的压力变送器，以便统一备件管理与校准流程。量程选择应覆盖正常工作压力和短时波动裕度，输出建议采用 4-20mA。为提高可靠性，可在关键应用中配置双传感器冗余或设置合理的低通滤波与异常保持策略，防止短时噪声引发误报警。



图 4-6 储能罐压力传感器

#### 4.6.4 位置检测传感器选型

罐笼位置和配重位置可根据现场条件选用编码器、接近开关阵列或磁致伸缩位移传感器。对于教学与仿真平台，可采用离散点位+HMI 映射方式实现分段控制验证；对于工程现场，建议优先采用连续位移检测方案，提升减速点与限速点切换精度。位置检测器件应关注分辨率、重复精度和抗震性能，必要时增加机械防护罩与防尘结构。



图 4-7 位移传感器

#### 4.6.5 速度检测方案选型

速度信号可由位置微分计算获得，也可通过测速编码器直接采集。直接测速方案实时性较好，但布置成本较高；位置微分方案实现简便，但对采样周期和滤波参数敏感。综合考虑系统复杂度和可维护性，建议在本方案中采用“位置计算为主、关键工况测速校核为辅”的组合策略，以兼顾实现成本与控制效果。



图 4-8 提升机测速编码器实物图

#### 4.6.6 电磁阀与比例阀选型

阀类执行器是制动动作的核心。换向阀、减压阀、节流阀和单向阀应满足系统最大流量与压力要求；比例溢流阀需具备稳定的电流-压力响应特性。若比例阀采用 0-10V 或 4-20mA 控制，应确保与 AO 模块量程一致，并在程序中增加输出限幅和斜率限制，避免液压冲击。选型时应核查线圈电压、响应时间、耐污染能力和温升特性。

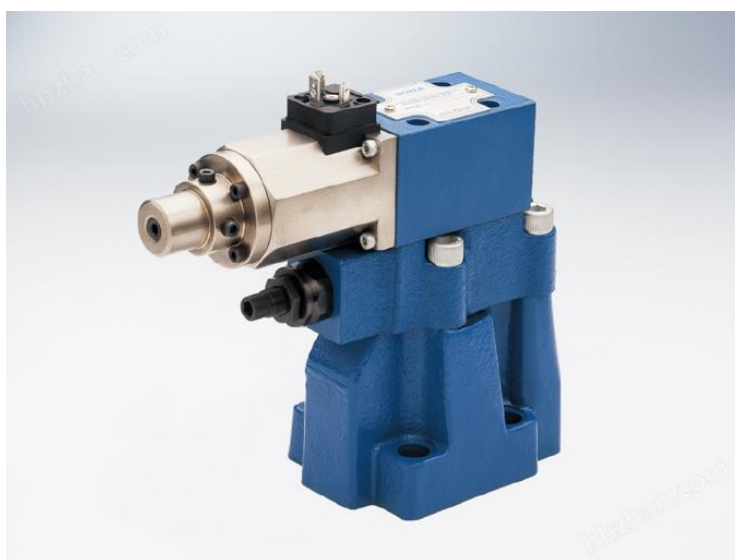


图 4-9 比例溢流阀实物图

#### 4.6.7 具体型号建议与替代方案

在毕业设计层面，可按“主推荐型号+同等级替代型号”给出选型策略。示例：压力变送器可选国产工业系列 0-16MPa，4-20mA，24V 供电，也可选国际品牌

同级产品；位置检测可根据预算在编码器与接近开关方案间切换；比例阀可优先选择本地维护渠道成熟的型号。该策略有助于在采购周期、预算限制和维护能力不同的条件下保持方案可实施性。

#### 4.6.8 安装、标定与验收要点

传感器安装后应进行零点与满量程标定，核对 PLC 工程量换算是否一致；阀类执行器投运前需进行空载动作测试与响应时间测试；位置和速度信号应在低速工况下进行一致性校核。验收建议包括：信号稳定性、线缆标识完整性、报警触发正确性、冗余与替代策略可执行性。通过“选型-安装-标定-验收”闭环，可显著降低后期维护难度。

表 4-2 传感器选型表

| 序号 | 测点/对象 | 器件类型      | 量程/规格                | 输出信号   | 精度      | 防护等级建议  | 预算区间        |
|----|-------|-----------|----------------------|--------|---------|---------|-------------|
| 1  | 闸盘压力  | 工业压力变送器   | 0-10MPa /<br>0-16MPa | 4-20mA | ≤0.5%FS | IP65及以上 | 200-800元/只  |
| 2  | 储能罐压力 | 工业压力变送器   | 0-16MPa /<br>0-25MPa | 4-20mA | ≤0.5%FS | IP65及以上 | 200-900元/只  |
| 3  | 罐笼位置  | 编码器/位移传感器 | 按井深选型                | 脉冲/模拟量 | 高重复精度   | IP65及以上 | 300-3000元/套 |

| 序号 | 测点/对象 | 器件类型      | 量程/规格 | 输出信号           | 精度     | 防护等级建议  | 预算区间        |
|----|-------|-----------|-------|----------------|--------|---------|-------------|
| 4  | 配重位置  | 编码器/位移传感器 | 按行程选型 | 脉冲/模拟量         | 高重复精度  | IP65及以上 | 300-3000元/套 |
| 5  | 速度检测  | 工业编码器     | 中高分辨率 | 脉冲             | 响应快    | IP65及以上 | 200-2000元/只 |
| 6  | 闸状态检测 | 接近开关/行程开关 | 常规工业型 | 开关量<br>PNP/NPN | 重复动作可靠 | IP67优先  | 50-300元/只   |

表 4-3 阀组与执行器选型表

| 序号 | 执行器名称 | 规格要点         | 控制方式          | 关键校核参数      | 预算区间        |
|----|-------|--------------|---------------|-------------|-------------|
| 1  | 比例溢流阀 | 匹配系统最大压力与流量  | AO 连续量        | 响应时间、线性度、温升 | 800-5000元/只 |
| 2  | 换向阀   | 双向动作、线圈24VDC | DO 开关量        | 换向时间、抗污染能力  | 300-2000元/只 |
| 3  | 减压阀   | 稳定减压、抗冲击     | DO 开关量 / 机械设定 | 压力稳定性、压降    | 200-1500元/只 |

| 序号 | 执行器名称    | 规格要点    | 控制方式          | 关键校核参数     | 预算区间           |
|----|----------|---------|---------------|------------|----------------|
| 4  | 节流阀      | 可调节流量   | DO 开关量 / 机械设定 | 调节范围、重复性   | 150-1200 元 / 只 |
| 5  | 单向阀      | 防逆流可靠动作 | 被动 / DO 联动    | 开启压力、密封性   | 100-800 元 / 只  |
| 6  | 油泵电机及接触器 | 满足液压站需求 | DO 开关量        | 启动电流、寿命、温升 | 按整机配置          |

# 第 5 章 PLC 控制软件设计

## 5.1 软件架构与编程规范

### 5.1.1 程序组织结构

程序采用主循环 OB+功能块 FB/FC+数据块 DB 结构。主程序负责模式管理和联锁逻辑，功能块负责模拟量处理与算法计算，数据块保存参数与状态变量。

### 5.1.2 变量命名规范

采用“设备\_功能\_属性”命名方式，如“按钮\_系统启动按钮”“数据\_模拟量\_闸盘压力”“数据\_参数设置\_压力上限”。命名统一可降低调试和维护成本。

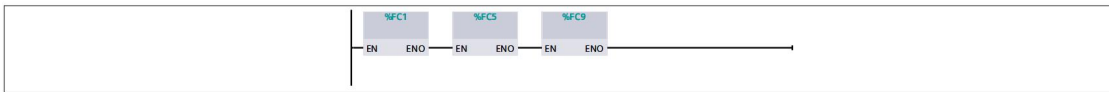
### 5.1.3 程序扫描与实时性控制

在 PLC 扫描周期内完成采集、计算、输出。关键联锁网络优先执行，避免因扫描先后导致状态竞争。必要时采用沿触发和定时器防抖。

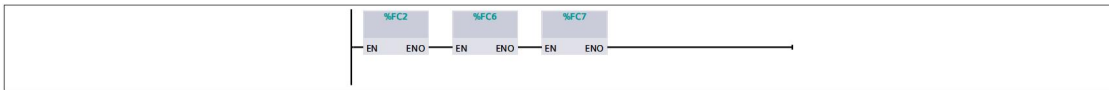
### 5.1.4 模块化调用顺序设计

为避免程序规模增大后出现调用混乱，建议在主循环中固定“输入采样-模式判定-联锁计算-执行输出-状态回写”的调用顺序。对于同一变量，坚持“单点写入、多点读取”原则，即关键状态位仅在一个网络中赋值，其余网络只读取判断，避免并发写入导致状态抖动。对需要跨周期保持的变量，应统一放入 DB 并设置初始值，防止断电重启后出现非预期状态。

网络 1：并行调用 FC1（画面跳转）、FC5（脉冲）、FC9



网络 2：并行调用 FC2（系统启停）、FC6（控制）、FC7（集中控制）



网络 3：并行调用 FC8（松闸条件）、FC10（HMI 动画）、FC11

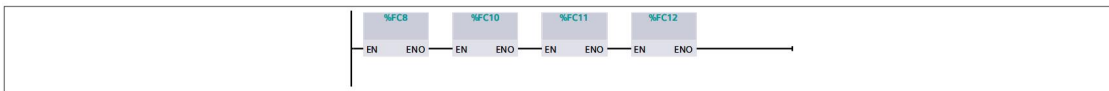


图 5-1 程序结构与块调用关系图

5.2 模式管理与基础控制逻辑设计

5.2.1 系统启停逻辑

系统启动后置位运行标志，允许油泵和阀控动作；系统停止后复位运行标志并进入安全状态。急停信号优先级最高，触发后立即切断风险输出并保持报警。

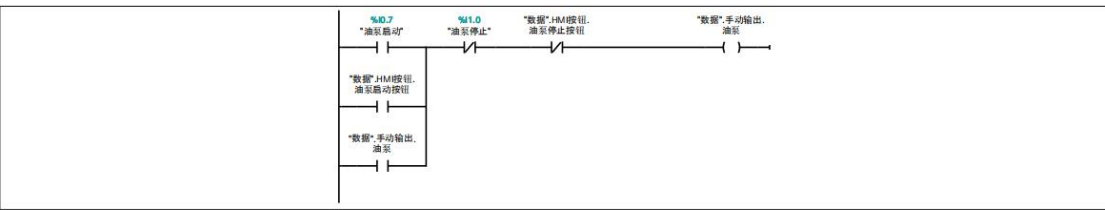
5.2.2 5.2.2 自动/手动模式逻辑

自动模式下执行完整工艺流程；手动模式下允许点动操作和模拟测试。模式切换需满足安全条件并更新模式指示灯。

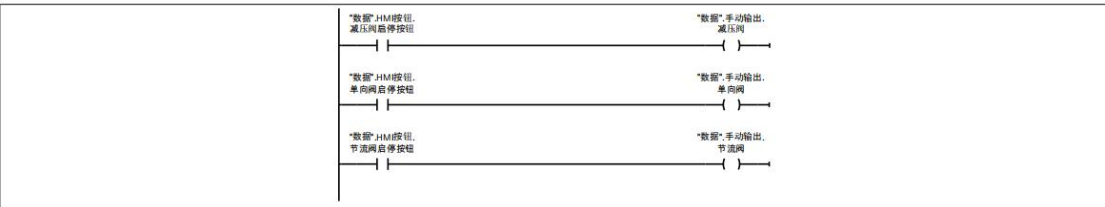
5.2.3 罐笼上提/下放逻辑

根据操作命令和联锁条件控制提升机上升或下降输出。上下行指令互锁，禁止同时置位。

网络 1：油泵启停联锁——物理“油泵启动”I0.7、“油泵停止”I1.0 与 HMI 油泵启停按钮配合



网络 2：HMI 上减压阀、单向阀、节流阀的启停按钮分别驱动对应“数据.手动输出.\*”，为后续 FC7 映射到 Q 点做准备。



网络 3：正常模式与检修模式提升按钮互锁，驱动“正常模式指示灯”Q1.4 与“检修模式指示灯”Q1.5。



网络 4：在正确模式指示前提下，“罐笼上提/下放”按钮分别置位/互锁“数据.手动输出.提升机上升、下降”，



网络 5：换向阀正向/反向按钮对“数据.手动输出.换向阀正向、反向”置位与互锁，避免换向阀同时得电。

图 5-2 模式管理梯形图

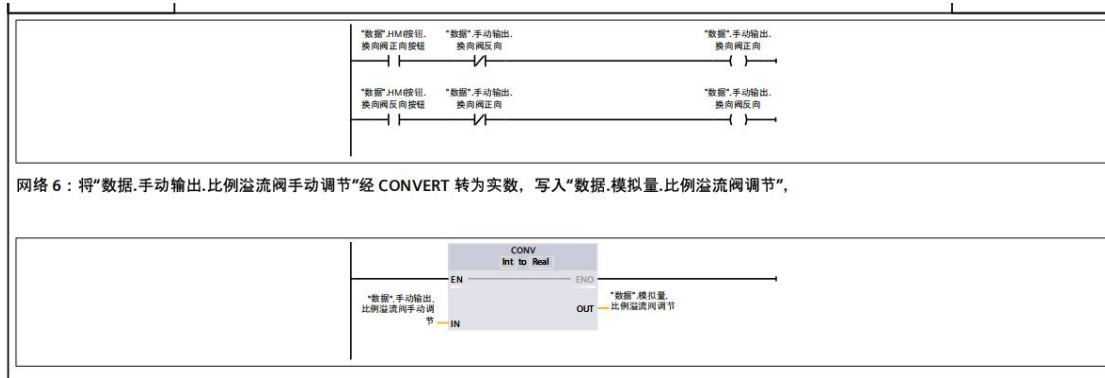


图 5-3 模式管理梯形图

## 5.3 制动联锁控制逻辑设计

### 5.3.1 闸打开与闸闭合控制逻辑

闸打开与闭合属于互斥状态。程序应根据制动阶段输出对应命令，并校验反馈信号。若命令和反馈不一致持续超时，触发故障闭锁。

### 5.3.2 正常停车控制逻辑

正常停车采用分阶段减速后抱闸策略，避免机械冲击。停车逻辑应结合当前位置和速度，平滑提升制动力。

### 5.3.3 紧急制动控制逻辑

紧急制动触发后，系统应立即执行最高优先级制动动作，快速切断相关输出并强制进入安全态，同时记录报警状态供人工确认。

### 5.3.4 联锁逻辑真值表设计

为了提升联锁逻辑可读性，建议将“允许条件”与“禁止条件”整理为真值表，例如：系统运行位=1、急停=0、总故障=0、闸状态反馈有效=1 时才允许进入下放控制。真值表可以直接映射为梯形图串并联关系，并可作为调试核对清单。通过“真值表-程序网络-现场测试”三者对应，能显著降低联锁遗漏风险。



图 5-4 制动联锁真值表与对应梯形图

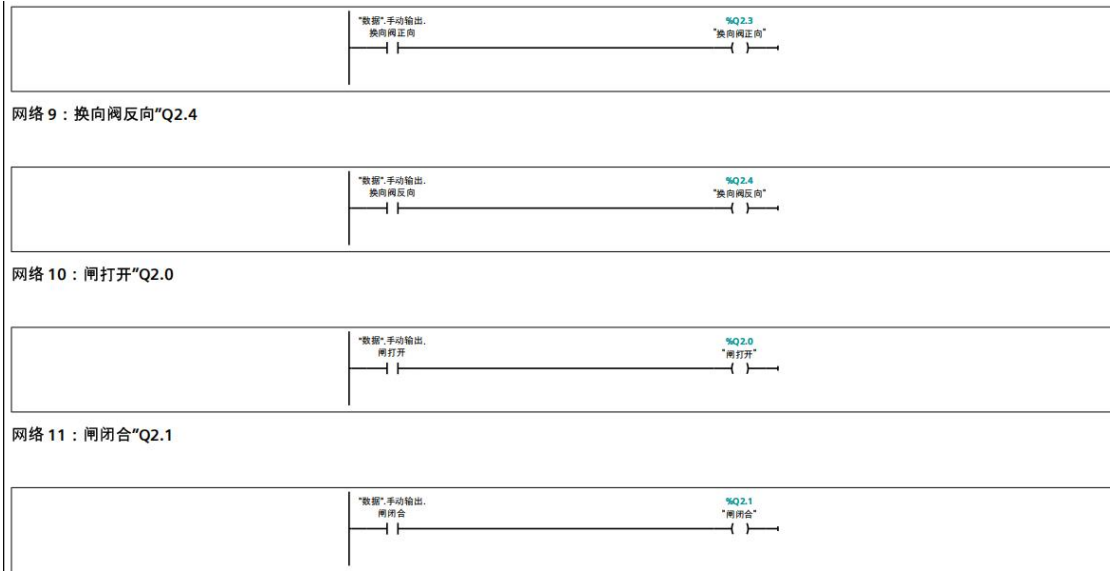


图 5-5 制动联锁真值表与对应梯形图

5.4 阀组协调控制逻辑设计

5.4.1 减压阀与单向阀控制

减压阀用于基础压力建立，单向阀用于油路方向保护。两者动作需满足先后关系，防止油路冲击。

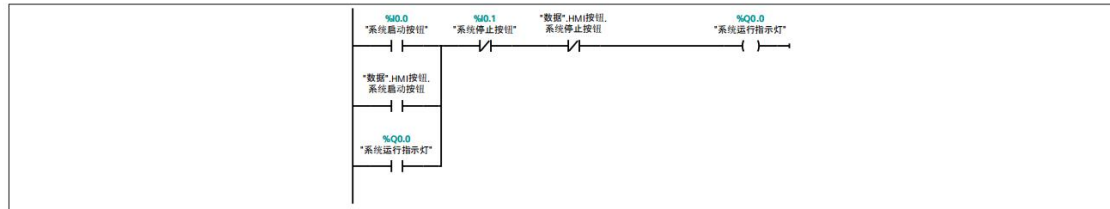
5.4.2 节流阀与换向阀控制

节流阀用于速度微调，换向阀用于流向切换。换向阀正反向输出互锁，且切换时应设置短延时避免抖动。

5.4.3 比例阀调节控制

比例阀通过 AO 输出实现连续调节。程序中应设置上下限、斜率限制和故障回落策略，保障压力调节稳定。

网络 1：启动停止



网络 2：HMI 停车制动

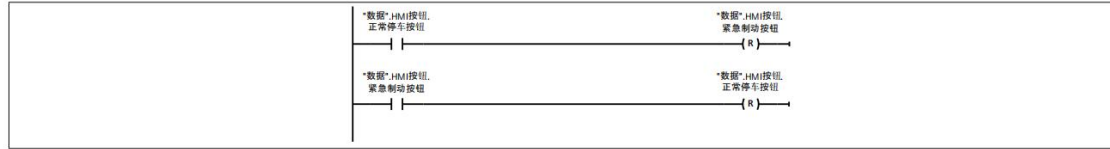


图 5-6 系统启停

## 5.5 模拟量处理与闭环调节设计

### 5.5.1 采集量工程化转换

闸盘压力和储能罐压力 AI 值需进行零点修正、比例换算和滤波处理，得到真实工程量用于逻辑判断和显示。

### 5.5.2 比例阀输出量映射

控制输出按设定压力目标映射至 AO 量程，需保证输出平滑。避免大幅跳变导致液压冲击。

### 5.5.3 压力闭环控制策略

通过压力偏差计算调节比例阀开度，形成简化闭环。结合减速点、限速点、到位点参数，实现分段压力控制。

### 5.5.4 闭环参数整定实例

在实际调试中，可选取“目标压力阶跃变化”作为整定工况，观察上升时间、超调量和稳态误差。若超调明显，则降低比例增益或增加输出斜率限制；若响应过慢，则适度提高增益并缩短滤波时间常数。整定时应在安全限幅内进行，且每次仅调整一个主参数。建议建立整定记录表，包含参数值、工况说明、趋势截图和结论，以便回溯最优组合。

### 5.5.5 模拟量异常工况处理流程

当检测到闸盘压力信号突变或丢失时，系统不应立即按异常值驱动执行机构，而应先进入“保护缓冲”状态：冻结输出到安全值、启动异常计时、提示运维检查。若异常在短小时内恢复，可自动返回闭环；若持续异常，则升级为故障闭锁。该流程既能防止误动作，也可减少瞬时干扰导致的无效停机。

网络 1：模拟量模块转换



图 5-7 模拟量转换

## 5.6 位置分段控制逻辑设计

5.6.1 到位点控制逻辑

到位点触发后系统进入停车段，提升制动力并执行闸闭合，确保稳定停车。

5.6.2 限速点控制逻辑

限速点用于约束速度上限，触发后提高压力给定并限制下放速度。

5.6.3 减速点控制逻辑

减速点是从稳定下放过渡至限速控制的关键点。逻辑应避免突变，采用渐进式压力提升。



网络 3：

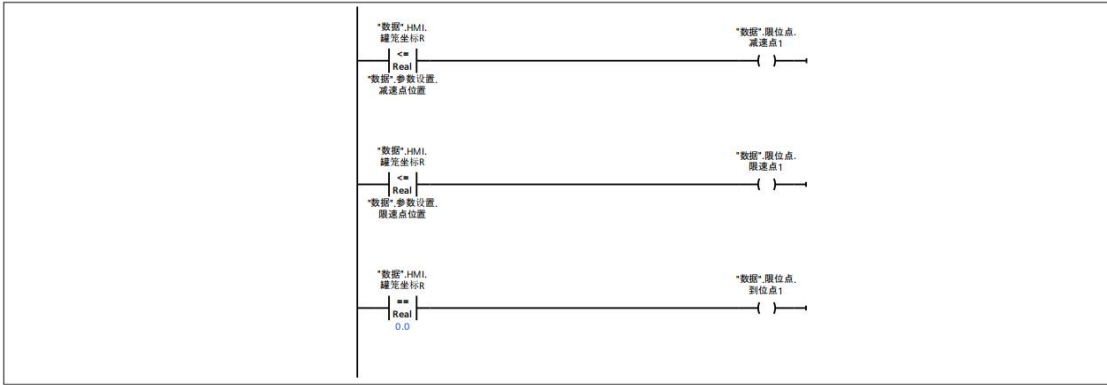


图 5-8 减速控制

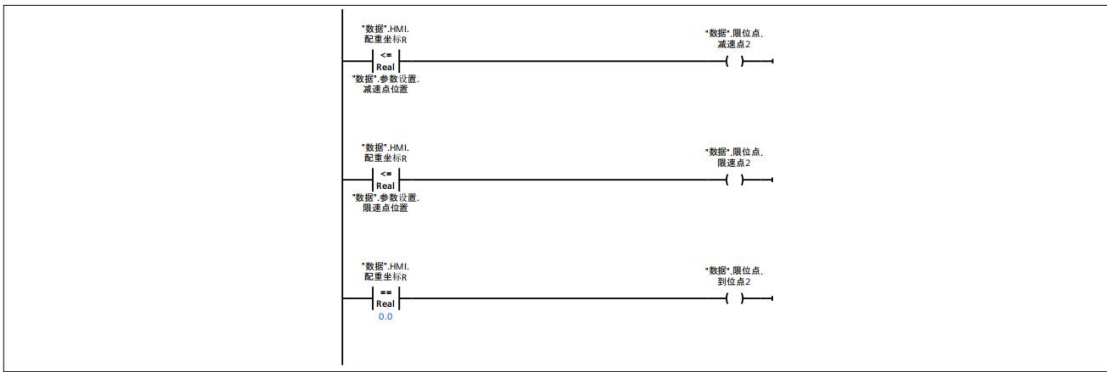


图 5-9 减速控制

5.7 报警与故障处理逻辑设计

5.7.1 报警分级设计

报警分为一般报警、重要报警和紧急报警。一般报警仅提示，重要报警限制部分动作，紧急报警触发闭锁和紧急制动。

### 5.7.2 故障闭锁与复位

关键故障置位后系统进入闭锁态，需人工确认并满足复位条件后解除。防止故障未消除时自动恢复运行。

### 5.7.3 故障事件记录

程序中应保留故障标志位、触发源和复位标志，便于 HMI 显示和后续分析。

### 5.7.4 故障链路时序分析

故障处理不仅要看“是否报警”，还要看“报警时序是否正确”。建议在程序中定义故障链路时序：故障触发检测、故障确认延时、闭锁输出执行、报警上送、人工复位确认。若时序颠倒，可能出现“已停机但未报警”或“先报警后闭锁滞后”的风险。通过在调试阶段记录关键时间戳，可验证故障链路完整性和实时性。

### 5.7.5 常见故障案例逻辑复盘

以“闸打开命令已发出但闸闭合反馈未释放”为例，程序应在设定超时报置位动作失败故障，并禁止继续下放命令；以“换向阀正反向同时请求”为例，程序应优先复位双向输出并提示互锁冲突；以“压力传感器量程越界”为例，程序应切换至保护输出并提示传感器异常。通过典型案例复盘，可将抽象故障逻辑转化为可执行的排障流程。

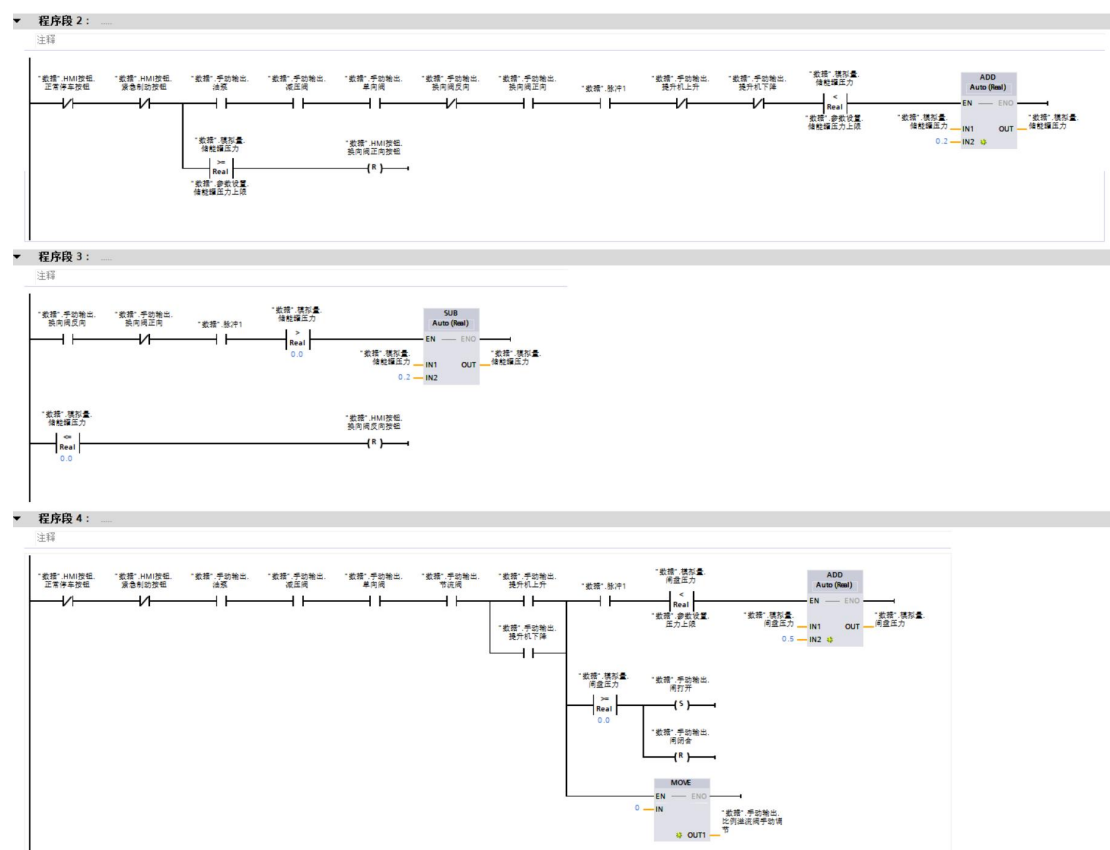


图 5-10 报警与闭锁时序图

## 5.8 参数整定与软件鲁棒性设计

### 5.8.1 参数整定流程

参数整定建议按“先安全、后性能”的步骤实施。第一步固定安全边界参数，如压力上限、速度上限、闸状态超时阈值，确保系统不会进入危险区；第二步整定分段点参数，如减速点、限速点、到位点位置；第三步整定动态参数，如比例阀调节增益、输出斜率限制。每次整定应仅修改少量参数，并记录修改前后趋势曲线，防止多参数同时变化导致原因不可追踪。

### 5.8.2 防抖与滤波策略

矿井现场开关量存在抖动，模拟量存在噪声。程序中可通过软件防抖定时器对按钮和反馈信号进行确认，通过滑动平均或一阶低通对压力信号进行滤波。需要注意的是，滤波时间常数不宜过大，否则会增加响应滞后，影响紧急工况控制。实际应用中应根据采样周期和工艺动态特性选择合适滤波参数。

### 5.8.3 异常值处理与故障降级

对模拟量可设置“硬限幅+变化率限幅+异常保持”三重保护：超过量程即钳位，突变过大则按最大允许变化率渐变，连续异常则保持上一有效值并报警。对开关量反馈可设置状态一致性校验，如命令与反馈长期不一致时置位故障。该机制可提升系统在传感器异常、线路接触不良等工况下的鲁棒性。

### 5.8.4 程序可测试性设计

为便于后续升级和维护，程序应预留测试位与模拟输入接口。通过 HMI 模拟关键信号可在不驱动现场设备条件下验证逻辑正确性，降低调试风险。对关键功能块建议增加输入输出监视变量，配合趋势和事件日志实现“黑盒变透明”，显著提高排故效率。

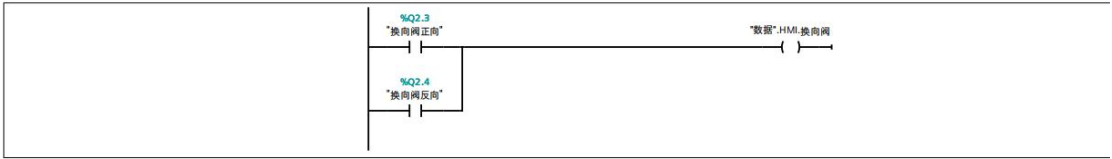
### 5.8.5 版本管理与变更控制

为防止现场程序“越改越乱”，建议建立版本管理机制：每次改动均记录版本号、修改内容、修改原因、测试结果和回退方案。程序下载前应进行离线仿真和联锁检查，下载后应进行最小功能回归测试。对于涉及安全联锁的改动，必须执行双人复核。该机制可以显著降低人为变更带来的系统性风险。

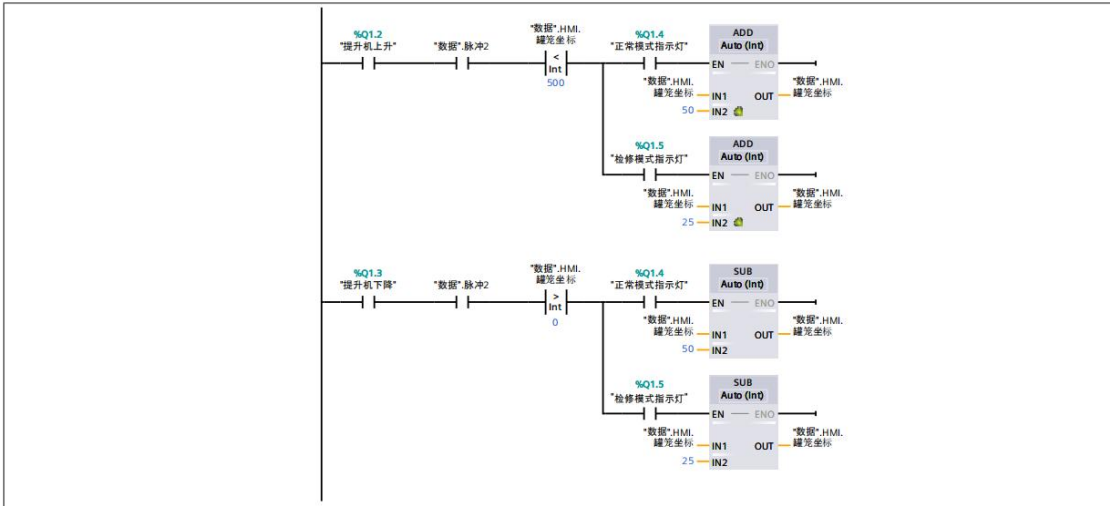
### 5.8.6 在线调试注意事项

在线监控时应避免频繁强制写入关键位，特别是联锁和输出控制位。建议采用“观察优先、必要时短时强制、完成即释放”的原则。对于自动模式运行中的调试，优先通过参数调节实现效果优化，而非直接篡改中间状态位。这样既可保持系统行为可解释，也可避免调试过程引入新的隐患。

网络 1：



网络 2：



网络 3：

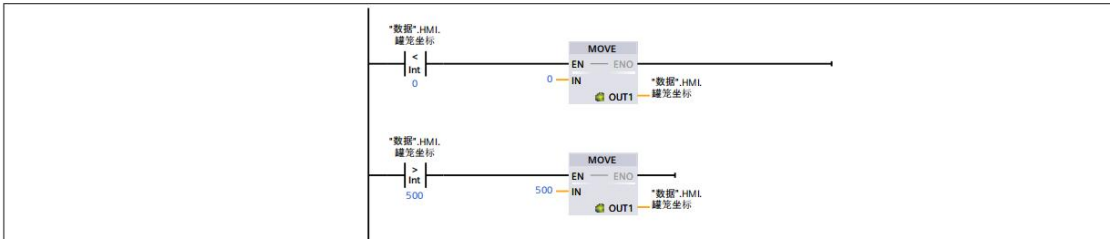


图 5-11 程序在线监控



网络 5：

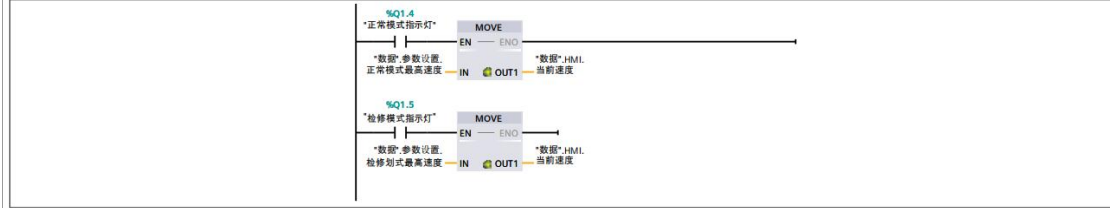


图 5-12 程序在线监控

# 第 6 章 第六章 HMI 监控画面与参数管理设计

## 6.1 HMI 总体设计原则

### 6.1.1 直观性原则

画面布局遵循“状态一目了然、操作路径最短”原则。核心变量置于主画面中央区域，关键按钮分组显示。

### 6.1.2 安全性原则

高风险操作按钮紧急制动模拟、模式切换设置颜色区分和权限约束，减少误操作。

### 6.1.3 可维护性原则

变量命名与 PLC 一致，报警文本标准化，便于维护人员快速定位问题。

## 6.2 主画面功能设计

### 6.2.1 位置与速度显示区

主画面显示罐笼位置、配重位置、当前速度，并配合棒图动态显示上下行状态，增强工况感知。

### 6.2.2 系统控制按钮区

提供系统启动/停止、油泵启动/停止、罐笼上提/下放、正常停车、紧急制动等按钮，支持手动测试和自动运行。

### 6.2.3 阀组状态显示区

显示减压阀、单向阀、节流阀、换向阀、比例阀状态，采用颜色动态变化反映动作结果。

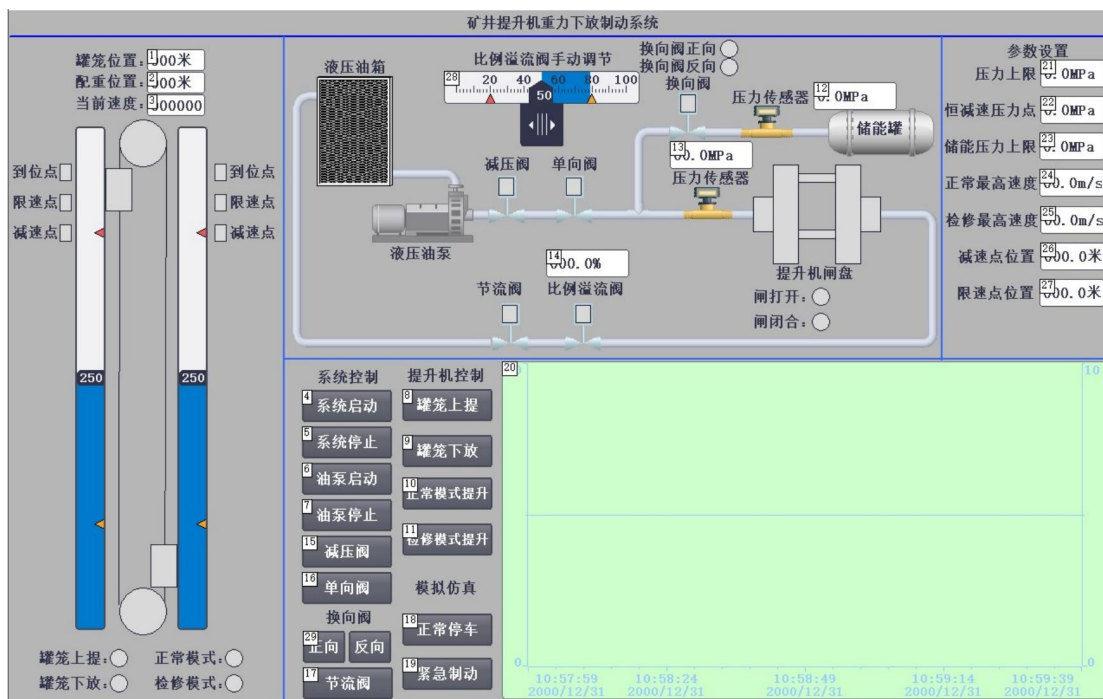


图 6-1 HMI 主画面

## 6.3 参数设置与趋势监控设计

### 6.3.1 参数设置页面设计

设置页面包括压力上限、恒减速压力点、储能压力上限、正常最高速度、检修最高速度、减速点位置、限速点位置等参数输入域。

### 6.3.2 参数生效与边界校验

参数写入前进行范围校验，超限拒绝写入并报警。参数修改后立即参与控制，必要时设置确认机制。

### 6.3.3 趋势曲线页面设计

趋势画面记录闸盘压力、储能罐压力、压力上限、恒减速压力点等曲线。用于观察调节过程与参数合理性。

## 6.4 报警画面与操作权限设计

### 6.4.1 报警显示机制

报警页面显示报警名称、状态、发生时机和优先级。未确认报警高亮显示。

### 6.4.2 操作权限管理

设置操作员、维护员、工程师三级权限。参数修改和高级控制仅对高权限开放。

### 6.4.3 交互优化设计

通过状态灯、文本提示和动态变化降低操作门槛。对关键按钮设置事件反馈，提升人机交互体验。

## 6.5 数据归档与运维支持设计

### 6.5.1 关键数据归档策略

为支撑事故复盘和维护优化，建议对关键变量进行周期归档和事件触发归档。周期归档用于形成运行趋势，建议采样变量包括闸盘压力、储能罐压力、罐笼位置、当前速度、比例阀输出；事件归档用于捕捉关键瞬间，建议记录模式切换、紧急制动触发、故障置位与复位时间戳。两类归档结合可构建完整运行画像。

### 6.5.2 报警处置闭环管理

报警管理不应止于“显示报警”，还应形成“发现-确认-处置-复盘”的闭环。HMI 可为常见报警绑定处理建议，“检查传感器接线”“检查阀线圈状态”“检查液压站压力建立情况”等，帮助一线人员快速定位。同时建议记录处理人员与处理时间，形成可追责、可统计的运维数据。

### 6.5.3 运维培训与标准化文档

系统交付后，人员能力差异是运行风险来源。建议配套操作手册、故障处理手册、参数说明书和调试记录模板，组织分层培训：操作员侧重规范操作和报警响应，维护员侧重硬件排查和参数校验，工程师侧重程序维护和系统优化。标准化文档与培训机制可显著降低人为失误概率。

# 第 7 章 系统调试与仿真验证

## 7.1 调试方案与步骤

### 7.1.1 单体调试

先完成电源、I/O 点位、按钮、指示灯、阀输出、模拟量采集单体检查，确保硬件接线正确、信号方向一致。

### 7.1.2 联动调试

在单体调试通过后执行联动调试，验证模式切换、启停流程、阀组联动、闸状态变化与位置分段逻辑。

### 7.1.3 保护调试

模拟急停、压力越限、阀反馈异常等故障，验证报警、闭锁、复位流程是否满足设计要求。

## 7.2 典型工况仿真测试

### 1) 工况 A: 正常模式重力下放

在正常模式下执行下放命令，系统应完成压力建立、阀组协同、分段减速、限速和到位停车。测试重点是速度平稳性与停车准确性。

### 2) 工况 B: 检修模式低速调试

在检修模式下进行点动控制，观察低速工况下阀组响应和闸状态变化，验证检修模式速度限制和联锁有效性。

### 3) 工况 C: 紧急制动触发

下放过程中触发紧急制动，系统应立即进入紧急逻辑，快速抱闸并闭锁输出。测试紧急制动响应时间和可靠性。

### 4) 工况 D: 参数扰动测试

调整减速点、限速点、压力上限等参数，观察系统动态响应。验证参数在线调整能力和边界校验有效性。

## 7.3 测试结果分析

### 7.3.1 响应性能分析

仿真结果显示，系统在重力下放过程中对压力给定变化响应及时，分段控制

过渡平滑。减速点后压力抬升有效抑制速度增长，限速点后速度趋于稳定。

### 7.3.2 安全联锁效果分析

急停、闸状态异常、阀互锁冲突等场景下，系统能够快速闭锁并报警。说明联锁链路“前置条件-动作命令-状态反馈-异常闭锁”完整有效。

## 第 8 章 结论与展望

本文基于 S7-1214C PLC、SM1234 模拟量模块及扩展 I/O 模块，完成了矿井提升机重力下放制动系统的工程化设计，建立了从工艺需求分析、硬件配置、I/O 映射、联锁控制、压力调节到 HMI 监控的完整技术链路。通过对正常下放、检修调试、紧急制动和参数扰动等典型工况的验证，系统在减速点、限速点、到位点控制中表现出较好的稳定性和响应性，能够实现阀组协同动作、闸状态可靠联锁和故障闭锁保护，满足矿井提升制动控制对安全性、实时性和可维护性的要求。

未来可在现有方案基础上进一步引入更高阶的速度-压力协同算法与数据驱动优化机制，例如基于历史工况数据的参数自整定、基于预测模型的制动力前馈修正以及远程诊断与健康评估功能，以提升系统在复杂载荷和扰动工况下的自适应能力。同时，可结合智能矿山建设需求，逐步实现与调度平台、设备管理平台和能耗管理平台的融合，推动矿井提升机制动系统由“可控运行”向“智能运行、预测维护、协同管理”方向升级。

## 致谢

回首数年求学岁月，从初识专业知识到独立完成课题研究，这段充实而珍贵的成长旅程即将画上句点。在课题研究与论文撰写的全过程中，无论是理论钻研、实验调试还是内容修改完善，都曾遇到诸多困惑与挑战。幸而有师长的悉心指引、同学的热心陪伴以及家人的默默支撑，让我得以克服重重困难，稳步推进各项研究工作，最终顺利完成本次毕业论文的全部内容。在此，我怀着万分诚挚的心情，向每一位给予我帮助、关怀与鼓励的人，致以最衷心的感谢与最真挚的敬意。特别感谢我的指导教师，在整个课题开展期间，老师以严谨务实的治学作风、渊博扎实的专业素养和耐心细致的指导方式，从选题构思、方案设计、逻辑梳理到细节修改，都给予了全方位的专业指导。面对研究中出现的问题，老师总能精准点拨、耐心解惑，及时纠正思路偏差，为我的研究指明方向，其严谨的科研态度与谦逊的处事方式，也让我受益匪浅、终身受用。同时感谢学院各位任课老师，课堂上的专业讲授与知识传授，为我搭建起完整的专业知识体系，为本课题的深入研究奠定了坚实的理论根基。

山水一程，同舟共济，很庆幸在求学路上遇见一群志同道合的伙伴。感谢身边的同窗挚友与室友，平日里我们相互探讨专业问题、交流学习心得，在学业压力中彼此宽慰、相互打气，在枯燥的研究过程中分享点滴日常，携手度过无数充实又温暖的朝夕，这份珍贵的同窗情谊，是求学途中难得的温暖收获。最要感恩我的家人，长久以来，他们始终无条件理解、包容与支持我，默默分担生活琐事，给予我物质保障与精神慰藉，包容我的忙碌与焦虑，成为我心无旁骛投入学习与研究的坚实后盾，让我能够不惧压力、安心前行。此外，也要感谢一路走来从未轻言放弃的自己，在反复打磨、不断坚持中沉淀成长。岁月无声，感恩所有相遇与陪伴，这段难忘的求学经历，已然成为我人生路上宝贵的财富。未来，我将怀揣这份温暖与感恩，铭记师长的教诲与亲友的期许，保持初心、脚踏实地，以更加沉稳的心态面对前路的挑战，不断学习、持续进步，在往后的人生道路上笃行致远、砥砺前行。

## 参考文献

- [1]郭爱军. 计及硬件设计的矿井提升机控制系统研究[J].机械管理开发,2026,41(03):227-228+248.
- [2]赵亚飞,王德强,唐浩,等. 矿井提升机控制策略设计研究[J].工程机械文摘,2025,(06):39-42.
- [3]原国栋. 基于可编程逻辑控制器的矿井提升机控制研究[J].机械管理开发,2025,40(01):161-162+210.
- [4]兰永平.基于 S7-1500PLC 的矿井提升机控制系统的优化设计[D].北方民族大学,2024.
- [5]刘振华,冯宏普,高委员. 矿井提升机控制技术研究[J].冶金与材料,2023,43(10):117-119.
- [6]崔建飞. 基于 Simulation X 的永磁外转子矿井提升机控制策略研究[J].自动化应用,2023,64(11):64-67.
- [7]Popolzin I . Mine hoist electric drive based on doubly-fed induction motor with combined control[J].Mining equipment and electromechanics,2023,165(1):
- [8]Xiao C ,Zhencai Z ,Tianbing M , et al. An Adaptive Dynamic Surface Technology-Based Electromechanical Actuator Fault-Tolerant Scheme for Blair Mine Hoist Wire Rope Tension Control System[J].Actuators,2022,11(10):299-299.
- [9]史晓龙. 基于 PLC 的矿井提升机控制系统设计与应用[J].机械管理开发,2022,37(08):227-229.
- [10]李海,王慧,徐平凡,等. 基于模糊 PID 的矿井提升机控制系统设计[J].煤炭技术,2022,41(07):182-184.
- [11]Xiang L ,Cai Z Z ,Gang S , et al. A nonlinear adaptive fuzzy controller with signal transmission delay compensation for steel rope tension active control of mining hoists[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering,2022,236(7):1335-1354.
- [12]付应彬. 基于变频调速的矿井提升机控制系统设计研究[J].机械管理开发,2022,37(05):277-279.
- [13]Xiao C ,Cai Z Z ,Bing T M , et al. Model-based sensor fault detection,

isolation and tolerant control for a mine hoist[J].Measurement and Control,2022,55(5-6):274-287.

[14]Zhang Y ,Zuo D ,Ai X . Research on Speed Control Method of Mine Hoist based on Improved Adaptive Particle Swarm[J].Journal of Physics: Conference Series,2022,2258(1):

[15]Huawei J ,Huwei X ,Shun W . Design and test of electromechanical disc brake controller for mine hoist[J].Measurement and Control,2022,55(3-4):146-154.

[16]武建军. 基于 PLC 的矿井提升机控制系统的设计研究[J].机械管理开发,2020,35(07):222-224.

[17]陈超. PLC 在矿井提升机控制系统中的应用 [J]. 内燃机与配件,2020,(06):215-216.

[18]胡晓文. 矿井提升机控制系统的自动化改造 [J]. 机械管理开发,2019,34(11):192-193+196.

[19]乔喆. 矿井提升机控制系统的自动化改造 [J]. 机械管理开发,2019,34(11):242-244.

[20]张晓羽. 基于 PLC 的矿井提升机控制系统的应用 [J]. 机械管理开发,2019,34(01):198-199.