摘要

恒液位控制在化工反应、城市与建筑给排水、锅炉汽包补水、循环冷却及实验教学装置中应用极为广泛。被控液位同时受进水调节机构泵组出力、出水负荷、环境温度与管路阻力等多因素影响，本质上呈现明显惯性与不可测扰动；若仍沿用传统的“高位启泵、低位停泵”双位控制，往往难以在调节品质与设备寿命之间取得平衡，表现为液位振荡、泵组频繁启停以及能耗上升等问题。本文面向典型的恒液位供水与缓冲水箱类对象，以西门子 TIA Portal V16 为软件平台、以 S7 系列可编程逻辑控制器为核心，完成一套工程化的恒液位过程控制系统设计：首先通过液位变送器采集过程值并完成工程单位标定；继而采用 PID_Compact 等效连续 PID 功能块得到连续调节量；再与“自动启泵控制”离散逻辑结合，实现 1#～3# 三台泵在负荷变化条件下的投切、延时与滞环控制，并辅以设备运行时间统计以实现轮换与维保提示；在无实物教学演示场景下，可借助“状态仿真”模块注入给定扰动，验证控制极性与联锁正确性。人机界面选用 TP1900 Comfort，对应项目运行时名称为「恒液位供水」，承担设定值给定、过程值与趋势监视、泵组状态与报警呈现等任务。电气主电路按照三台三相异步电动机分别驱动三台离心泵的典型接线进行设计，每台回路配置熔断器 FU、接触器 KM、热继电器 FR 及可靠接地，满足短路、过载与操作安全的基本要求。经仿真手段与现场实验台联机调试表明，在设定值阶跃与出水负荷扰动条件下，液位偏差可被限制在工程允许带内，泵组启停节奏受控，系统具备较好的稳定性、可维护性与教学演示价值。

关键词：PLC；恒液位；PID；多泵切换；TIA Portal V16；人机界面；变频与工频协同；

Abstract

Constant liquid-level control is widely used in chemical processes, water supply systems, boiler feed applications, and educational pilot plants. This paper presents an engineering design of a PLC-based level regulation system using Siemens TIA Portal V16. The process variable is derived from a level transmitter and scaled to engineering units; a PID function block produces a continuous actuation demand, while automatic pump staging coordinates three motor-driven pumps with time delays and hysteresis to avoid chattering. Runtime accumulation supports balanced service scheduling, and a state-simulation feature assists signal-injection testing without physical hardware. The human-machine interface on a TP1900 Comfort panel, titled "Constant Liquid Level Water Supply," implements setpoint entry, monitoring, and alarming. The main circuit protects each pump motor with fuses, contactors, and thermal overload relays. Experimental or simulated tests under setpoint steps and load disturbances demonstrate regulated level error and disciplined pump switching, indicating feasibility for laboratory training and small-scale engineering retrofits.

Key Words: PLC, constant liquid level, PID, pump sequencing, TIA Portal, HMI, industrial 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 液位参数在流程工业与公共设施中的作用 8
1.1.2 双位控制与连续调节的工程矛盾 8
1.1.3 本课题的研究意义与教学价值 9
1.2 国内外研究现状与 PLC 技术的应用发展 9
1.2.1 工业过程控制与先进控制策略概述 9
1.2.2 国内供水与液位控制工程实践特点 10
1.2.3 西门子 SIMATIC 平台在液位控制中的优势 10
1.3 研究内容与技术路线 11
1.3.1 主要研究内容 11
1.3.2 技术路线 11
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 13
2.1 被控对象描述与工艺前提 13
2.1.1 工艺过程抽象 13
2.1.2 控制目标与定量指标建议 13
2.1.3 扰动与不确定因素 14
2.2 功能需求与非功能需求 14
2.2.1 自动控制与恒液位闭环 14
2.2.2 手动、检修与旁路 15
2.2.3 安全、联锁与故障响应 15
2.2.4 可视化、记录与运行时间统计 15
2.2.5 非功能需求：实时性与可靠性 15
2.3 总体方案与信号流结构 15
2.3.1 四层体系结构 15

2.3.2 连续调节与离散执行的分工 16
2.3.3 与本项目程序块的对应关系 16
2.3.4 物质平衡视角下的液位动态机理定性 16
第 3 章 硬件系统设计 18
3.1 主电路与电机保护 18
3.1.1 三台泵主电路拓扑说明 18
3.1.2 熔断器与短路保护 18
3.1.3 接触器与交流回路 18
3.1.4 热继电器与过载保护 18
3.1.5 接地与等电位 18
3.2 传感器与测量设备选型 19
3.2.1 测量任务与仪表分类 19
3.2.2 液位变送器类型比选与本案取向 19
3.2.3 量程、精度、输出与供电 20
3.2.4 极限液位开关与联锁 20
3.2.5 安装、取压与抗干扰要点 20
3.3 执行机构与动力设备选型 21
3.3.1 离心泵：型式、台数与并联概念 21
3.3.2 三相异步电动机与主电路参数匹配 21
3.3.3 工频启停与变频调速的取舍 21
3.3.4 阀门、底阀与管路附件简述 21
3.4 PLC、模拟量与数字量模块规划 22
3.4.1 PLC 本体与扩展能力 22
3.4.2 模拟量输入通道与标定 22
3.4.3 数字量输入输出清单示例化 22
3.5 I/O 地址分配、端子与文档一致性 23
3.5.1 成组编号原则 23
3.5.2 软件互锁与硬件互锁互补 23
3.6 电气柜布线、屏蔽与 EMC 24

3.6.1 强弱电分槽与绑扎 24
3.6.2 屏蔽层接地方式 24
3.6.3 继电器与接触器浪涌抑制 24
3.7 供电、散热与柜体环境 24
3.7.1 控制电源与 UPS 考虑 24
3.7.2 散热与防护等级 24
第 4 章 PLC 控制程序设计 25
4.1.1 程序总体结构与执行流程 25
4.1.2 程序块组成与功能分工 25
4.1.3 主程序 OB1 的循环扫描机制 26
4.1.4 数据块与全局变量组织方式 26
4.2 主程序 Main 设计分析 27
4.2.1 初始化网络设计 27
4.2.2 状态仿真调用与调试准备 28
4.2.3 系统启停与模式切换逻辑 28
4.2.4 手动控制与输出驱动逻辑 29
4.2.5 报警与运行时间处理 31
4.3 PID 液位反馈控制设计 32
4.3.1 PID 控制块接口与控制任务 32
4.3.2 PID 算法实现机理 32
4.3.3 参数设定与控制方向分析 33
4.3.4 PID 输出与限幅改进分析 33
4.4 自动启泵与变频协同控制设计 34
4.4.1 自动启泵控制块的功能定位 34
4.4.2 启泵延时与分级投入逻辑 35
4.4.3 故障切换与泵组冗余设计 36
4.4.4 变频器频率计算与输出限幅 36
4.5 设备运行时间累计与维护支持设计 38
4.5.1 运行时间统计原理 38

4.5.2 时间换算与工程应用意义 38
4.5.3 清零权限与数据管理 39
4.6 状态仿真与报警保护设计 40
4.6.1 状态仿真模块的程序作用 40
4.6.2 高低液位报警逻辑 40
4.6.3 安全保护逻辑的程序体现 41
4.7 本章小结 42
第 5 章 HMI 人机界面与通信设计 43
5.1 触摸屏硬件与项目概况 43
5.1.1 TP1900 Comfort 43
5.1.2 运行时项目名称 43
5.2 画面结构与导航逻辑 43
5.2.1 主监控画面 43
5.2.2 泵控制与手动页面 44
5.2.3 报警与事件页 44
5.3 用户权限与操作审计 45
5.3.1 分级口令 45
5.3.2 关键操作记录 45
第 6 章 系统调试 46
6.1 调试阶段划分与前置条件 46
6.1.1 绝缘与绝缘电阻检查 46
6.1.2 单机空载与负载试车 46
6.2 仿真与无实物调试 46
6.2.1 状态仿真块联调 46
6.2.2 强绑 I/O 测试 46
6.3 联机闭环整定步骤 46
6.3.1 模拟量零点和满度校准 46
6.3.2 闭环投运顺序 47
第 7 章 结论与展望 48

7.1 研究工作总结 48
7.2 不足与改进方向 48
7.3 展望 48
7.4 工程经济性 48
致谢 49
参考文献 50

第 1 章 绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 液位参数在流程工业与公共设施中的作用

液位既是表征容器内介质储量的基本过程量，也是许多成套装备安全与经济运行的关键约束。反应釜液位过低可能造成搅拌器干运行换热恶化，液位过高则容易引起夹带与溢出风险；高层建筑供水与二次加压系统中，缓冲水箱稳压环节的液位与压力往往联合决定用户体验与设备磨损程度。由此，液位控制早已从“看得见、靠经验”走向“可测、可控、可追溯”的闭环技术路线，成为自动化、电气与测控专业人才培养中的经典对象。

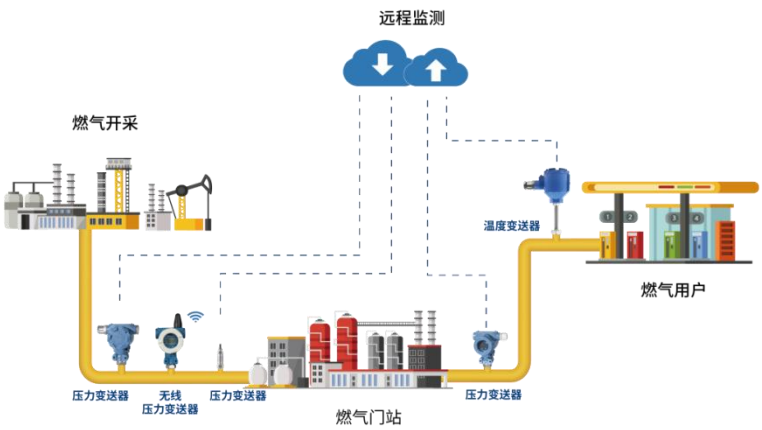


图 1-1 流程工业与市政设施中的液位测控应用场景图

1.1.2 双位控制与连续调节的工程矛盾

在预算受限对控制精度要求不高的场合，采用两个液位开关实现“高启低停”仍较为常见。此类双位控制结构简单、器件成本低，但在泵扬程、管网阻力与负荷变化较快时，液位容易围绕目标值形成较大幅度振荡；同时，泵电机在短时间内的反复启动会显著增加接触器与电机绕组的热应力。与之相比，引入连续测量与 PID 反馈，再配合多泵投切变频调速，可以在满足液位精度的前提下降低启停频次，实现节能与延寿的综合收益。

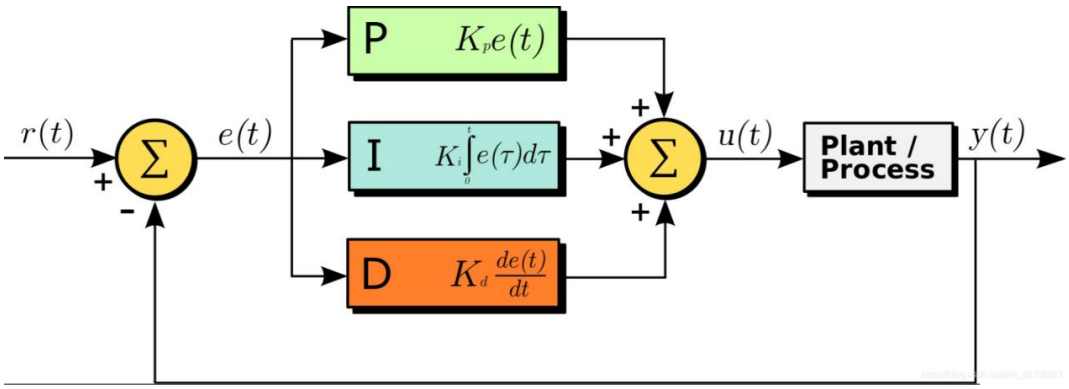


图 1-2 PID 控制示意图

1.1.3 本课题的研究意义与教学价值

本课题以“西门子 TIA Portal V16 + PLC + 三台泵主回路 + 触摸屏 HMI”为主线，贯通电气设计、闭环控制、顺序与联锁逻辑、人机交互与调试方法，既贴合中小型恒液位 / 恒压供水改造项目的技术现实，也可作为机电类、自动化类专业的综合实训载体。学生工程人员通过本课题能够建立从主电路到控制程序的完整认知，掌握 PID 参数与离散执行层级之间的协调思想，为后续从事过程控制设备集成打下基础。

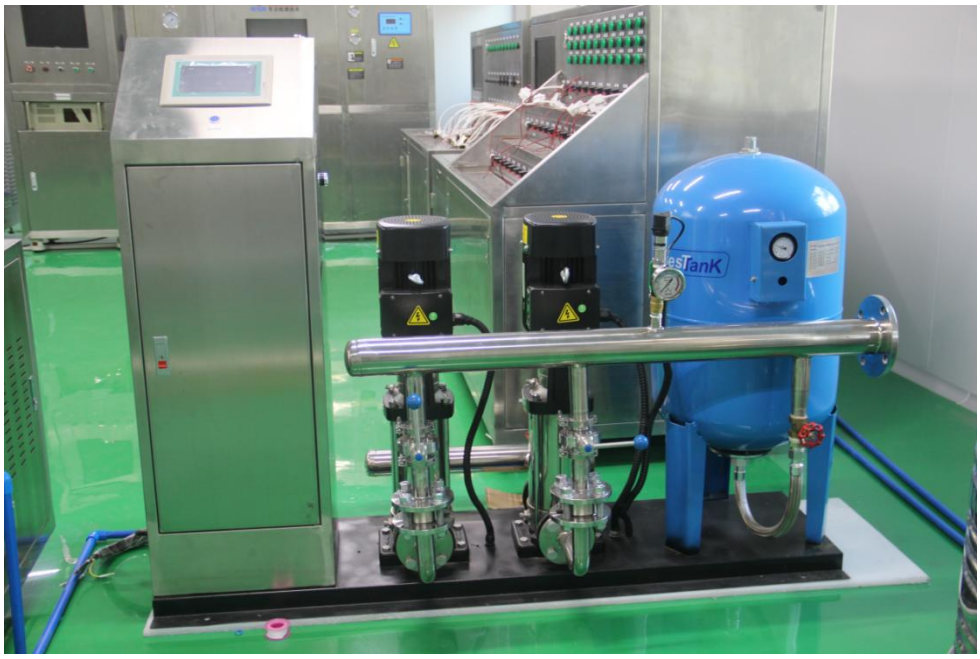


图 1-3 过程控制恒压/恒液位供水实训装置

1.2 国内外研究现状与 PLC 技术的应用发展

1.2.1 工业过程控制与先进控制策略概述

发达国家在过程控制领域起步较早，PID 及自整定、增益调度、模型预测

控制、模糊 PID 等多种方法在石油化工、制药与能源行业有大量应用案例。就液位对象而言，经典一阶惯性加纯滞后模型仍是分析与整定的基础；对于具有明显积分特性的水箱环节，抗积分饱和、输出限幅与采样周期匹配是必须考虑的工程细节。近年来，基于数据驱动与边缘计算的优化控制逐步兴起，但在多数中小规模泵站与楼宇供水场景中，结构清晰、成本可控的 PLC+PID+变频／多泵方案仍占主流。

1.2.2 国内供水与液位控制工程实践特点

国内市政与建筑给排水领域大量采用 PLC 专用供水控制器完成恒压、恒液位与分时调度任务。典型实施路径包括：压力液位作为外环、变频器频率作为内环；多泵并联时以台数切换实现粗调、变频微调。相关项目普遍重视硬件联锁、故障自保持与触摸屏报警分级。与大型市政项目相比，教学实验装置与小型改造项目更强调可重复拆装、I/O 清晰、程序模块化，以便排故与二次开发。

1.2.3 西门子 SIMATIC 平台在液位控制中的优势

西门子 S7-1200/1500 系列在 TIA Portal 集成环境下提供统一的程序、硬件组态与仿真手段，PID_Compact 指令支持在线参数修改与趋势观察，与 WinCC／Comfort 触摸屏可实现无缝标签与报警同步。相较分散的脚本开发方式，TIA 更有利于版本管理与团队协作。本项目选用 V16 版本，与博途上一代项目如由 V15 升级而来兼容，便于继承既有程序块与 HMI 画面。

图 1-4 西门子 S7-1200 PLC

1.3 研究内容与技术路线

1.3.1 主要研究内容

1 从工艺角度界定被控对象与控制指标，明确扰动类型与可测信息量；2 给出“检测—控制—执行—交互”四层体系结构，并与本项目中的 PID 控制块、自动启泵控制块、设备运行时间、状态仿真等程序单元建立映射；3 依据主电路 PDF 阐述三台泵电机回路中短路、过载、接地等保护配置原则，并专章论述液位传感器与泵/电机等执行设备的选型依据；4 详述模拟量液位采集标定、PID 正反作用与输出分层、泵台数切换判据与延时滞环设计；5 说明 TP1900 HMI 画面组织、权限管理与报警策略；6 给出从脱机仿真到联机整定的调试步骤与结果评价指标。

1.3.2 技术路线

本文遵循“需求分析→总体方案→硬件设计与选型论证→软件结构与功能块划分→HMI 组态→联机调试→结果总结”的路线推进。每一阶段产出与下一阶段的接口如 I/O 表、标签命名、DB 结构保持一致性，降低返工概率。

1.4 论文结构安排

第 1 章绪论；第 2 章为系统需求分析与总体方案含本项目 HMI 备选图，细

化工艺约束与功能、非功能需求；第 3 章为硬件系统设计，含主电路、传感器与测量/执行设备选型论证、PLC 与 I/O 规划、电气柜与电磁兼容要点；第 4 章为 PLC 软件设计，深入到 PID、启泵、时间累计与联锁；第 5 章为 HMI 人机界面；第 6 章为调试与结果分析；第 7 章为结论与展望。文后附参考文献与与本项目文件对应关系的附录说明。

第 2 章 系统需求分析与总体方案设计

2.1 被控对象描述与工艺前提

2.1.1 工艺过程抽象

本系统将受控环节抽象为带集中入流与出流的开口密闭水箱：入流由一台多台离心泵从低位提升旁路补充而来，出流由用户侧阀门负载模拟机构消耗。液位升高表示净入流大于净出流，反之则液位下降。工程上当出流阶跃增大时，若入流侧调节不足，液位将持续下跌直至触发低液位保护。因此恒液位控制的本质是：通过调节入流侧有效能量泵台数、转速阀门开度使在额定扰动下液位偏差限定于允许带。

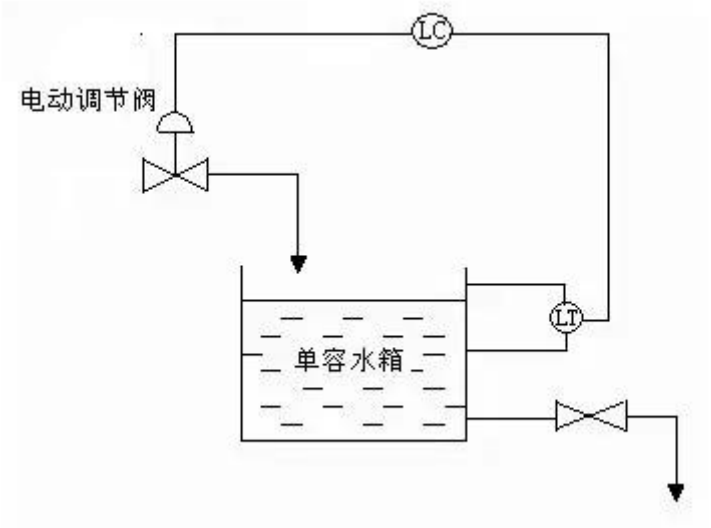


图 2-1 容水箱工艺对象与入流、出流示意

2.1.2 控制目标与定量指标建议

结合课程设计常见任务书，建议将静差、最大动态偏差、调节时间、泵每小时启停次数上限作为评价维度。静差指进入稳态后测量液位与设定值之差；最大动态偏差用于描述负荷阶跃冲击下的最坏情况；调节时间可取进入 $\pm\varepsilon$ 带并不再越出时刻；泵启停次数则反映离散执行策略是否过于灵敏。具体数值应依据水箱截面积、泵流量曲线与传感器量程在现场标定后确定。

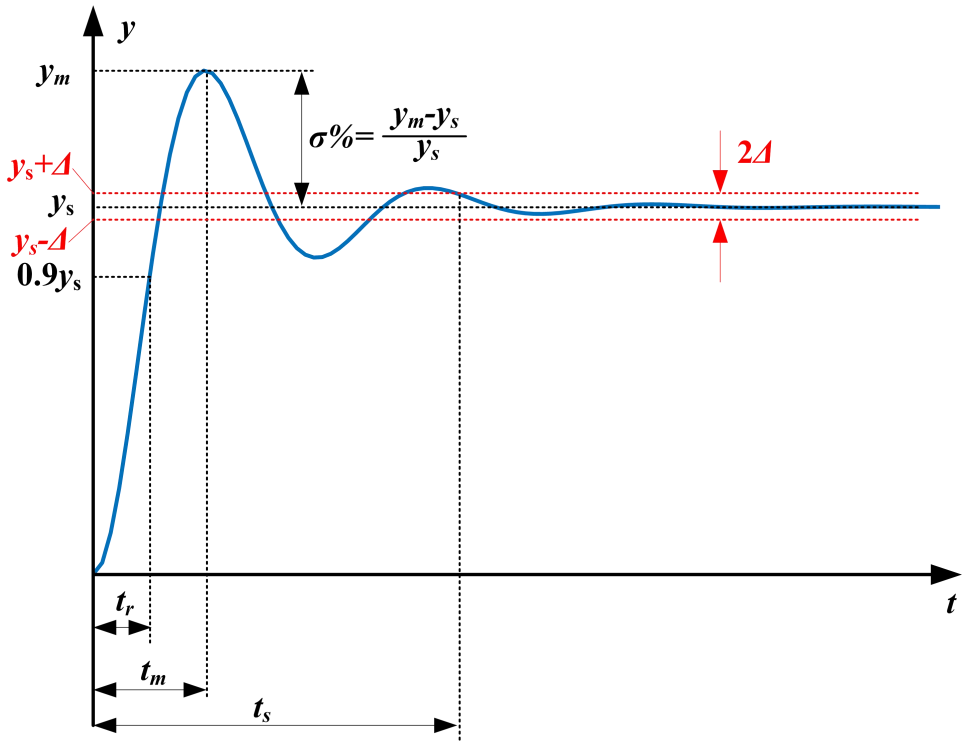


图 2-2　阶跃响应与性能指标超调、调节时间、静差

2.1.3 扰动与不确定因素

典型扰动包括：出水阀开度突变、入流管路局部堵塞、泵效率随磨损下降、液位传感器温漂与安装高度误差等。部分扰动可测量如出口流量计，部分只能依靠反馈抑制。设计时应为极限液位保留硬件与软件双重保护，避免单一传感器失效导致灾难性干运行。

2.2 功能需求与非功能需求

2.2.1 自动控制与恒液位闭环

在自动模式下，PLC 周期性读取液位过程值 PV，与设定值 SP 比较后送入 PID；PID 输出作为“需求流量”“等效调节强度”，再由自动启泵模块翻译为泵台数指令变频器给定。若硬件仅为工频接触器切换，则需将连续输出分段离散化，并引入足够的切换死区与时间窗。

图 2-3 恒液位闭环控制一般结构检测

2.2.2 手动、检修与旁路

为满足调试与检修，应提供单泵点动、强制切除某台泵、屏蔽非关键报警在授权前提下等能力。所有手动操作须受模式互锁与急停优先约束，防止在自动运行中误触。

2.2.3 安全、联锁与故障响应

主电路中热继电器 FR 的常闭触点串联于对应接触器回路作为 PLC 输入，PLC 在检测到过载跳闸后应锁定故障并要求人工复位。低液位低于干运行限时禁止启泵；高液位可联动溢流报警关闭补充泵。急停按钮宜采用硬件切断接触器线圈电源安全继电器输出，软件侧同步清除泵启动命令。

2.2.4 可视化、记录与运行时间统计

HMI 应能显示 PV/SP、各泵运行 / 停止 / 故障、累计运行时间、当前报警列表与历史摘要。运行时间累计用于轮换策略：优先启动累计时间最短的泵，当单泵累计超阈值时给出保养提示。

2.2.5 非功能需求：实时性与可靠性

液位采样周期应数倍于 PLC 扫描周期并小于过程主导时间常数的十分之一量级经验性准则，现场可微调。通信方面，PLC 与 TP1900 之间以太网连接应规划合理的画面刷新周期，避免过频读写影响扫描负载。

2.3 总体方案与信号流结构

2.3.1 四层体系结构

检测层：液位变送器及必要的极限开关；控制层：S7 PLC，内部运行 PID 与顺序控制逻辑；执行层：接触器、泵电机，可选变频器；交互层：TP1900 Comfort 触摸屏，项目名「恒液位供水」。信息流自上而下为设定与参数，自下而上为测量与状态。

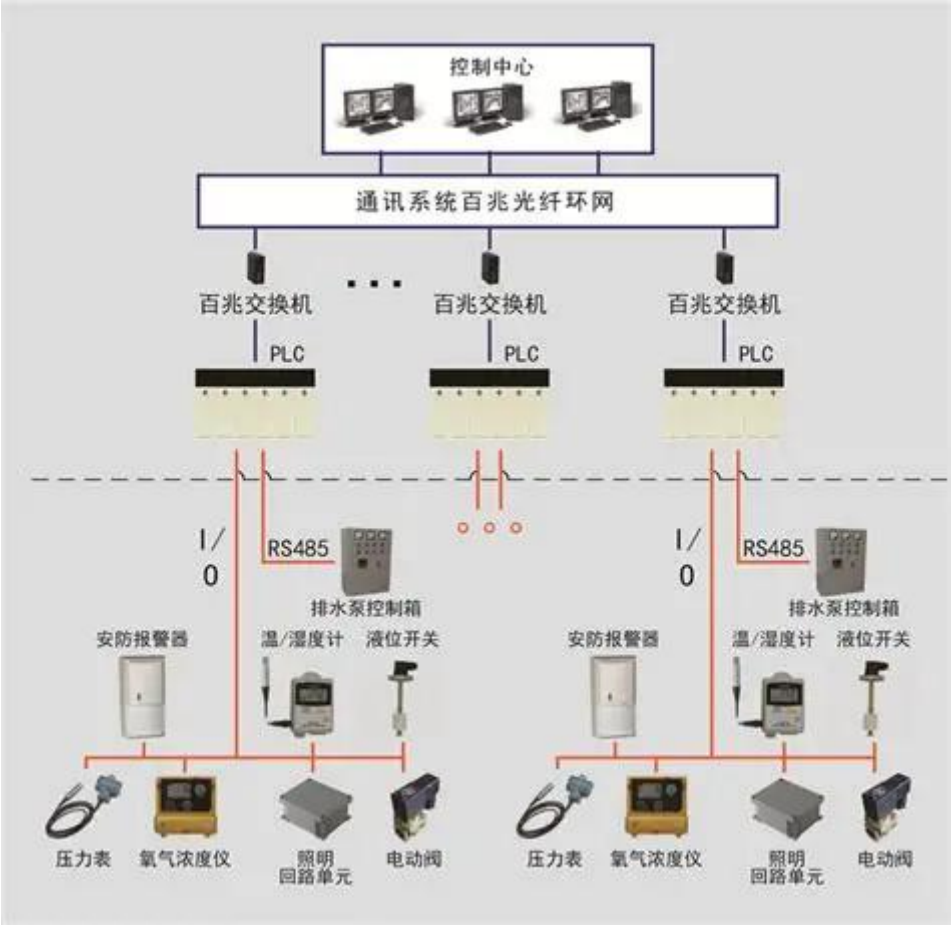


图 2-4 四层体系结构“现场—控制站—人机界面”信息架构

2.3.2 连续调节与离散执行的分工

PID 负责“细调”，决定总体还需要多少泵能力等效转速；启泵模块负责“粗调”，按分段区间决定台数增减。二者若不协调，会出现 PID 输出振荡而泵频繁切换的问题。工程上常将 PID 输出滤波加大切换滞环，并在台数变化后短时冻结积分以避免积分冲击。

2.3.3 与本项目程序块的对应关系

PID 控制及 PID 控制_DB：实现液位反馈调节；自动启泵控制及 自动启泵控制_DB：实现泵台数与接触器输出逻辑；设备运行时间及相关 DB：统计各泵累计接通时间；状态仿真及 状态仿真_DB：在无液位硬件时向 PID 注入可编程过程信号；Main：组织调用与模式管理。该划分有利于在线诊断与单独测试各子系统。

2.3.4 物质平衡视角下的液位动态机理定性

在理想化假设下，若将水箱截面积视为近似常数 A，则液位变化率与净入

流流量之差成正比，即 dh/dt 正比于 Q_in − Q_out。其中 Q_in 由泵组与阀位决定，Q_out 由下游负荷决定。上述关系说明液位对象具有积分特性：若 Q_in 与 Q_out 长期不等，液位将持续偏离直至触及物理极限；闭环控制通过改变 Q_in 使 Q_in 与 Q_out 在平均意义上相等。工程上水箱往往非理想柱体、截面积随液位变化，且管路中存在滞后与阻力非线性，因此真实对象常表现为有惯性与附加滞后的高阶系统，PID 参数需在现场细调，不宜仅凭纸面模型一次到位。

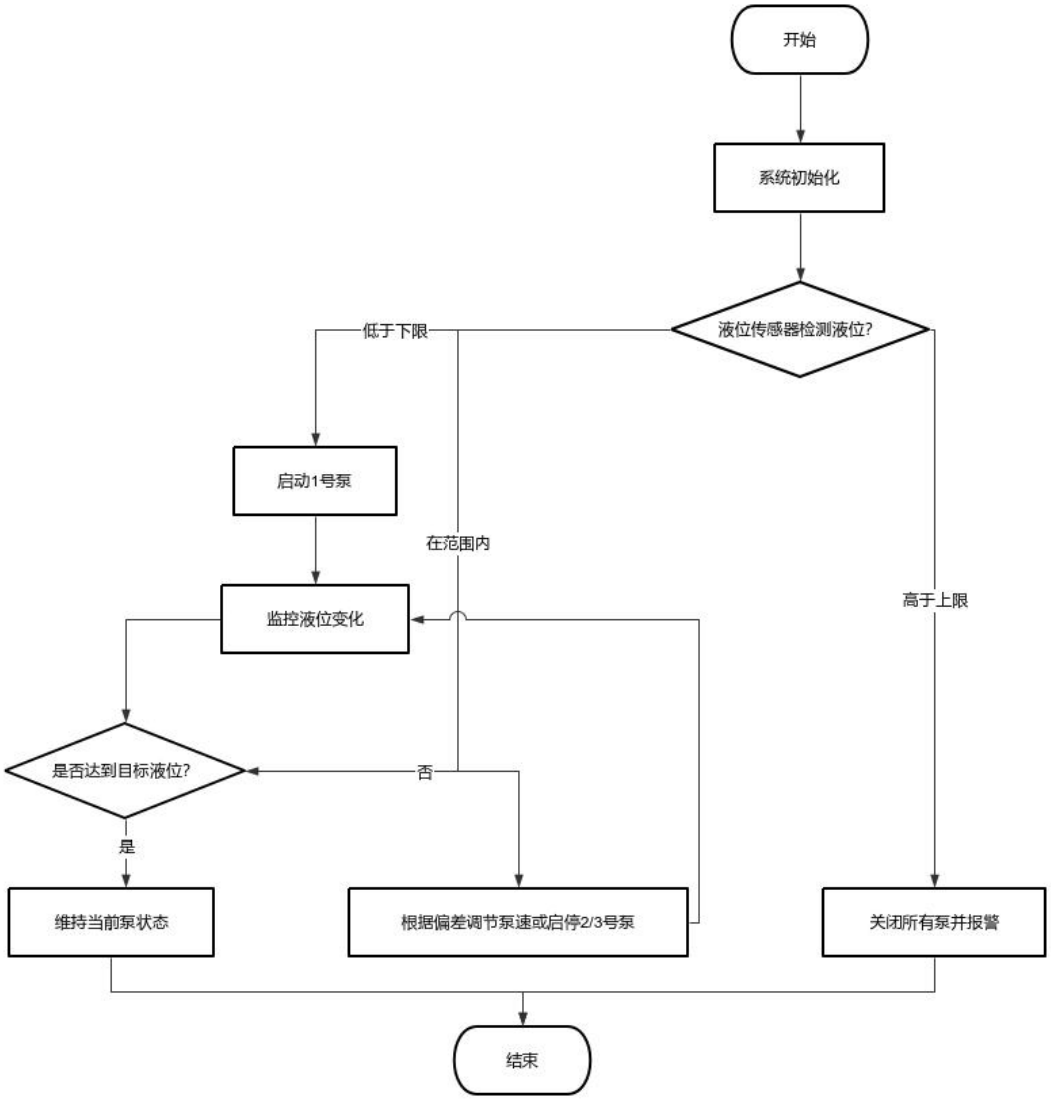


图 2-5 系统总体结构图

第 3 章 硬件系统设计

3.1 主电路与电机保护

3.1.1 三台泵主电路拓扑说明

系统采用三台三相异步电动机 M1、M2、M3，分别驱动 1#、2#、3# 泵。每台电机独立回路，便于隔离检修与故障定位。三相电源经断路器刀熔开关，视图纸层级进入各泵回路，实现有选择性的停电操作。

3.1.2 熔断器与短路保护

FU1～FU3 用于短路过流初期剪切，选型需与电缆载流量、电机额定电流协调，并注意与其他级差保护的选择性配合。教学中应强调：熔断器不可替代热继电器的过载保护职能，二者分工不同。

3.1.3 接触器与交流回路

KM1～KM3 为线圈由直流 AC220 V 控制的交流接触器，主触点串于电机定子回路。PLC 数字量输出经中间继电器驱动线圈，可实现强弱隔离与触点容量扩展。接触器选型应满足电机额定电流、使用类别 AC-3 及线圈电压等级。

3.1.4 热继电器与过载保护

FR1～FR3 的热元件串入主回路，常闭辅助触点反馈至 PLC 串入线圈回路。当电机长期过载断相时，热继动作需人工复位后方可再启动，以防止故障未排除即反复冲击电网与机械密封。

3.1.5 接地与等电位

GND1、GND2、GND3 表示各回路保护接地汇接点，最终在电控柜内与 PE 母排相连，接地电阻需满足项目所在地规范。良好接地可显著降低感应电压导致 PLC 模拟量跳变的风险。

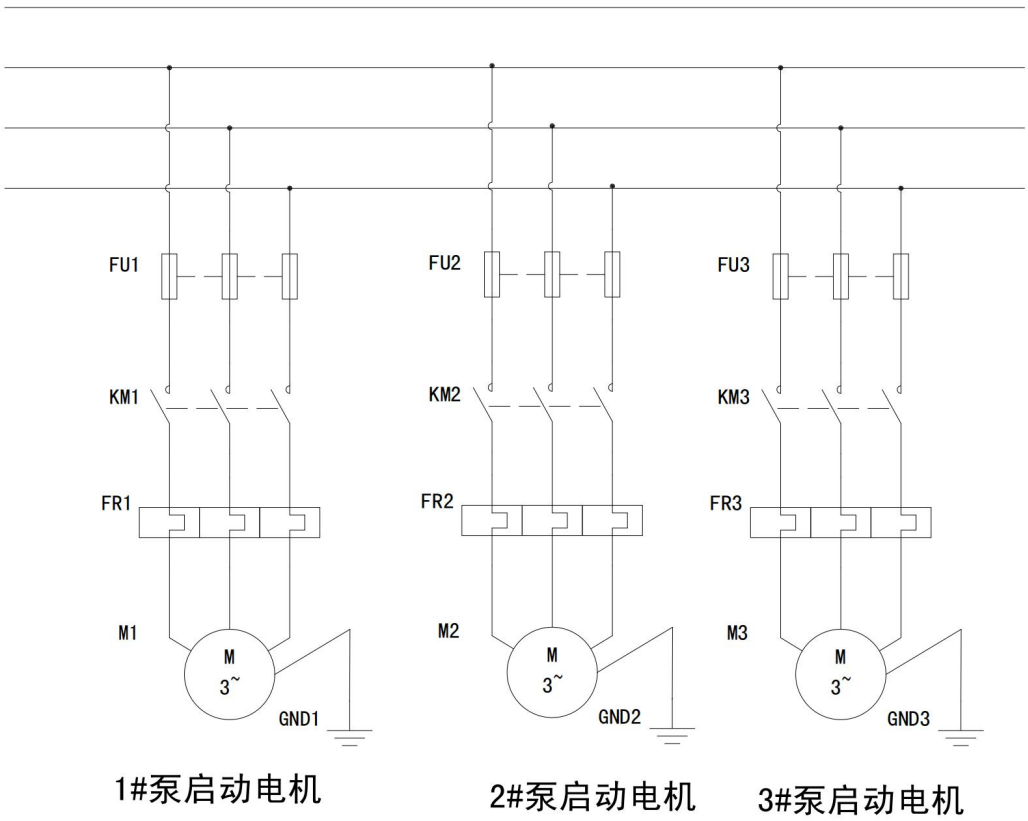


图 3-1 三台泵主电路原理图

3.2 传感器与测量设备选型

3.2.1 测量任务与仪表分类

恒液位闭环需要连续可测的过程值 PV，故检测层以连续量仪表为主；同时配置高、低极限液位开关浮球开关作为硬件联锁与干运行保护，与软件报警互为补充。按测量原理可分为：静压/差压式、浮子连续式、超声波、雷达、电容式等。教学装置与一般清水介质场景下，静压投入式法兰差压变送器配合 4～20 mA 输出最为常见，与 S7 系列模拟量输入模块匹配成熟。

3.2.2 液位变送器类型比选与本案取向

静压式：将感压元件置于底部侧壁引压，液柱高度与表压近似线性ρgh，敞口罐可对大气；密闭罐需差压变送器测气相与液相压差。优点是稳定性好、标定直观；缺点是引压管堵、介质结晶时需维护。超声波/雷达：非接触，适合腐蚀工况，但泡沫、蒸汽与内件反射会引入噪声。电容式：对介质介电常数敏感，换介质时需重新标定。综合成本、可维护性与本项目「水箱+离心泵」工艺，正文

以 4～20 mA 液位变送器作为主测量，并在 I/O 表与 PLC 程序中预留量程上下限与故障位。

3.2.3 量程、精度、输出与供电

量程应覆盖工艺最低、最高液位并留 10～20 裕度，避免长期贴顶贴底运行。精度等级如 0.1、0.25、0.5 FS 影响 PID 稳态误差与报警门限设定；教学实验可选用 0.5 级以控制成本。输出优先选用 4～20 mA 二线制，断线可被 PLC 判为低于 4 mA 故障；若选用 0～10 V，须注意导线压降与共地。供电 24 V DC 宜由柜内直流电源集中供给并加熔断/隔离，与动力线分槽敷设。

3.2.4 极限液位开关与联锁

在模拟量故障程序异常时，高高位、低低位开关仍应能触发停泵禁止启动。可选用音叉、浮球、电极式等，触点型接入 PLC 数字量输入；选型时注意介质温度、黏度与安装位置。联锁逻辑应在图纸与程序中一致标注，避免仅软件限位无硬件备份。

3.2.5 安装、取压与抗干扰要点

引压管应设排污、排气，户外需防冻伴热时单独说明。变送器外壳接地与屏蔽层单端接地方式须与图 3-2PLC 侧接线统一，减少模拟量跳变。若采用投入式探头，应注意电缆固定与防水等级 IP。

图 3-2 MDM700 液位变送器

3.3 执行机构与动力设备选型

3.3.1 离心泵：型式、台数与并联概念

本系统以三台离心泵并联向水箱管网补水，每台对应一台三相异步电动机见图 3-1。选型需满足额定流量与扬程工作点落在泵特性曲线高效区；多泵并联时应注意曲线叠加与运行台数切换时的工况迁移。课程设计若未给出具体曲线，可在文中定性说明「按任务书额定流量与几何扬程初选泵型，现场通过阀门开度与电流表复核」。

3.3.2 三相异步电动机与主电路参数匹配

电机额定功率、额定电流、极数、接法△/Y 须与泵轴功率及供电电压一致；接触器、热继电器、熔断器及电缆截面按电机额定电流与启动方式直接启动降压选择，详见第 3.1 节与主电路图。多台电机并列运行时，尚须校核变压器进线断路器允许的同时启动容量。

3.3.3 工频启停与变频调速的取舍

工频泵由接触器投切，配合本项目的自动启泵与滞环逻辑即可实现多台阶流量，一次投资低。变频方案可对单台多台泵调速，连续改变流量，节能与软启优势明显，但需变频器、谐波治理与 EMC 设计。本设计以工频三路为主电路落脚点，论文中保留变频扩展讨论；若实验台已含变频器频率给定程序.pdf 中曾出现相关网络，可在图注中说明「装置扩展功能」。

3.3.4 阀门、底阀与管路附件简述

吸入口宜设过滤器，出口设止回阀以防水锤与倒流；调节阀、手动闸阀的开度构成出流侧扰动，调试阶段用于模拟负荷变化。具体管径与阀门型号按工艺任务书实验室现有管路填写。

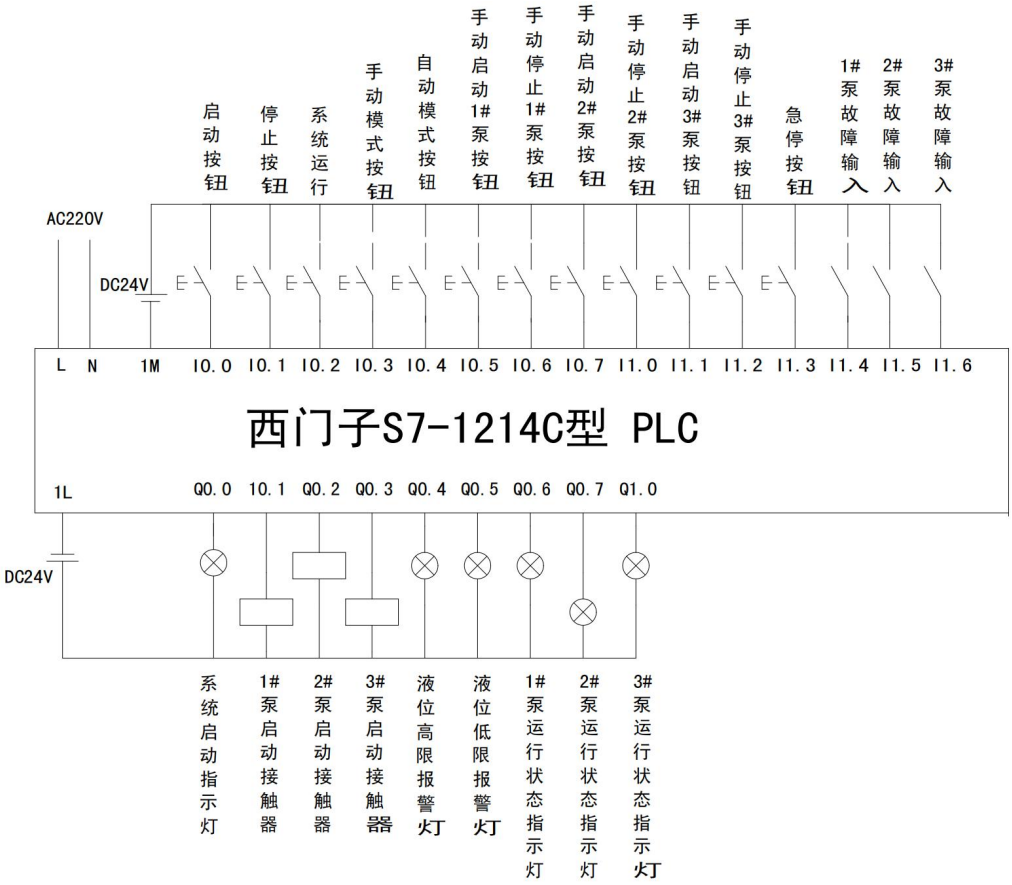


图 3-3 PLC 控制电路原理图

3.4 PLC、模拟量与数字量模块规划

3.4.1 PLC 本体与扩展能力

S7-1200 适合点数适中、网络简洁的本项目；若 I/O 富余量较大需运动控制冗余，可选用 S7-1500。应在订货阶段核对模拟量分辨率、通道隔离与共模电压指标，与第 3.2 节所选变送器输出类型匹配。

3.4.2 模拟量输入通道与标定

将 4～20 mA 转换为工程单位液位需线性标定：在零液位与满液位两点多点记录原始 A/D 值与真实高度，编制换算 FC 在 HMI 侧统一处理。必要时对信号做一阶滤波以抑制随机噪声。

3.4.3 数字量输入输出清单示例化

数字量输入可包含：系统启动、停止、急停、手 / 自动选择、各 FR 正常反馈、极限液位开关等；数字量输出可包含：KM1～KM3 驱动、运行指示灯、故障蜂鸣器等。具体端子须与电气原理图一一核对。

3.5 I/O 地址分配、端子与文档一致性

3.5.1 成组编号原则

同类信号在输入映像区连续排列，便于查找与扩展；命名为“DI_Pump1Overload_OK”一类可读风格，利于跨文档沟通。

3.5.2 软件互锁与硬件互锁互补

例如禁止在硬件上同时两泵共用同一错误的相序，但软件仍应防止程序异常导致的非法组合视工艺允许多泵并联不允许多泵同时启动。互锁逻辑应在 FC/FB 中集中实现，避免散落在多处网络难以维护。

表 3-1　数字量输入输出分配

序号	输入名称	输入地址	输出名称	输出地址
1	启动按钮	I0.0	系统启动指示灯	Q0.0
2	停止按钮	I0.1	1#泵启动接触器	Q0.1
3	系统运行	I0.2	2#泵启动接触器	Q0.2
4	手动模式按钮	I0.3	3#泵启动接触器	Q0.3
5	自动模式按钮	I0.4	液位高限报警灯	Q0.4
6	手动启动 1#泵按钮	I0.5	液位低限报警灯	Q0.5
7	手动停止 1#泵按钮	I0.6	1#泵运行状态指示灯	Q0.6
8	手动启动 2#泵按钮	I0.7	2#泵运行状态指示灯	Q0.7
9	手动停止 2#泵按钮	I1.0	3#泵运行状态指示灯	Q1.0
10	手动启动 3#泵按钮	I1.1		
11	手动停止 3#泵按钮	I1.2		
12	急停按钮	I1.3		
13	1#泵故障输入	I1.4		
14	2#泵故障输入	I1.5		
15	3#泵故障输入	I1.6		

3.6 电气柜布线、屏蔽与 EMC

3.6.1 强弱电分槽与绑扎

动力线与信号线分槽敷设，交叉正交；避免长距离平行走线，减小互感干扰。弯曲半径满足电缆厂家要求。

3.6.2 屏蔽层接地方式

模拟信号屏蔽宜单端接地在仪表侧 PLC 侧，避免地环路；若有高频干扰严重，可配合磁环与滤波端子。

3.6.3 继电器与接触器浪涌抑制

线圈并联 RC 压敏元件可减缓关断过电压，延长触点寿命并减少 PLC 输入毛刺。

3.7 供电、散热与柜体环境

3.7.1 控制电源与 UPS 考虑

为 PLC、HMI、变送器供电的开关电源应有足够的功率裕量与短路保护；关键场合可配置短时 UPS 防止瞬时掉电造成误动作。

3.7.2 散热与防护等级

电控柜风扇空调需与柜内总发热匹配；进线格兰与橡胶密封关系户外防雨防尘等级。

第 4 章 PLC 控制程序设计

4.1.1 程序总体结构与执行流程

4.1.2 程序块组成与功能分工

本系统 PLC 软件并非将全部逻辑堆叠在单一主程序中，而是采用“主程序组织 + 功能块分工 + 实例数据块存储”的模块化设计思路。整个工程的核心程序块主要包括：Main [OB1]、PID 控制 [FB1]、设备运行时间 [FB2]、状态仿真 [FB3]、自动启泵控制 [FB4]，以及与之对应的 PID 控制_DB [DB1]、设备运行时间_DB [DB2]、设备运行时间_DB_1 [DB3]、设备运行时间_DB_2 [DB4]、自动启泵控制_DB [DB5]、状态仿真_DB [DB6]。这种划分方式使液位闭环调节、泵组台数切换、运行时间累计和仿真测试等功能相互解耦，既便于调试，又便于后期维护和扩展。

其中，Main [OB1]作为循环组织块，承担系统初始化、模式判断、功能块调用和输出刷新等总调度任务；PID 控制 [FB1]负责根据设定液位与反馈液位计算控制输出；自动启泵控制 [FB4]负责依据液位偏差和启泵延时逻辑决定泵的投入顺序及工频/变频切换；设备运行时间 [FB2]用于统计各台泵的累计运行时间；状态仿真 [FB3]则用于在无真实液位对象或调试阶段下模拟液位变化过程，辅助程序联调。各数据块用于保存输入、输出、内部状态和历史量，使控制算法在循环扫描过程中具有连续性。

程序块

Main [OB1]

Main 属性							
常规							
名称	Main	编号	1	类型	OB	语言	LAD
编号	自动						
信息							
标题	"Main Program Sweep (Cycle)"	作者		注释		系列	
版本	0.1	用户自定义 ID					

名称	数据类型	默认值	注释
Input			
Initial_Call	Bool		Initial call of this OB
Remanence	Bool		=True, if remanent data are available
Temp			
Constant			

网络 1：初始化赋值

图 4-1 程序块总体结构与项目程序目录

程序块

设备运行时间 [FB2]

设备运行时间 属性							
常规							
名称	设备运行时间	编号	2	类型	FB	语言	LAD
编号	自动						
信息							
标题		作者		注释		系列	
版本	0.1	用户自定义 ID					

名称	数据类型	默认值	保持	从 HMI/OPC UA/Web API 可访问	从 HMI/OPC UA/Web API 可写	在 HMI 工程组态中可见	设定值	监控	注释
Input									
运行信号	Bool	false	非保持	True	True	True	False		
清零按钮	Bool	false	非保持	True	True	True	False		
秒时基脉冲	Bool	false	非保持	True	True	True	False		
Output									
InOut									
运行时间_天	Int	0	非保持	True	True	True	False		
运行时间_时	Int	0	非保持	True	True	True	False		
运行时间_分	Int	0	非保持	True	True	True	False		
运行时间_秒	Int	0	非保持	True	True	True	False		
Static									
时标志位	Bool	false	非保持	True	True	True	False		
上升沿	Bool	false	非保持	True	True	True	False		
分标志位	Bool	false	非保持	True	True	True	False		
秒标志位	Bool	false	非保持	True	True	True	False		
Temp									
Constant									

图 4-2　程序块总体结构与项目程序目录

4.1.3 主程序 OB1 的循环扫描机制

从程序打印稿可见，Main [OB1]采用典型的 PLC 循环扫描方式。CPU 上电后首先执行初始化网络，对控制系统中的关键参数进行默认赋值，如设定液位、PID 参数 Kp、Ki、Kd、积分初值、上次误差、最大/最小输出、变频器频率上下限以及液位高低限报警值等。这种初始化方法保证了系统在首次下载或重新上电后能够迅速进入一个可运行的基础状态，避免由于内部变量未赋值而引起的控制异常。

在完成初始化后，主程序按网络顺序继续执行状态仿真调用、系统启停判定、手自动模式切换、手动单泵操作、自动控制调用、变频器频率换算、频率限幅、流量估算、三台泵输出控制、运行时间累计以及高低液位报警判断等内容。由于 PLC 每个扫描周期都按相同顺序重复执行这些网络，因此系统能够持续获得最新液位状态并及时修正输出，实现闭环控制。

4.1.4 数据块与全局变量组织方式

本项目在程序设计中较多使用存储器位 M 区、字 MW 区和双字 MD 区传递运行状态与模拟量参数。例如，MD100 用于存储设定液位，MD104 用于存储反馈液位，MD108 用于存储控制输出，MD112、MD116、MD120 分别用于存储 Kp、Ki、Kd 参数，MD152 用于存储变频器频率，MD156、MD160 分别表示液

位高限和液位低限报警值。与此同时，三台泵的手动启动、自动启动、工频/变频状态、故障状态等，也都通过 M 位进行逻辑组合。

这种做法在教学项目中具有结构直观、监控方便的优点，便于在博途监控表和 HMI 画面中直接读取关键变量。但从工程角度看，若后续系统规模扩大，建议将更多过程参数封装进结构化数据块中，以减少绝对地址过多带来的维护难度。尽管如此，就本恒液位控制系统而言，现有“功能块 + 实例 DB + 少量全局变量”的组织方式已经能够较好满足控制与调试要求。

4.2 主程序 Main 设计分析

4.2.1 初始化网络设计

在 Main [OB1]的网络 1 中，程序利用多个 MOVE 指令，在首扫描位 FirstScan 有效时完成关键参数的初始化。根据程序归档稿，系统将设定液位初值写入 MD100，将 PID 参数 Kp、Ki、Kd 分别写入 MD112、MD116、MD120，并对积分量、上次误差、最大输出、最小输出、变频器频率及液位报警限值进行统一赋初值。该设计的优点在于：一方面保证控制器启动时拥有明确的初始控制参数；另一方面减少了人为遗漏参数设定所导致的系统不稳定风险。

从控制理论角度分析，液位系统属于具有明显惯性和累积特征的对象，若系统上电后 PID 积分项为随机值，往往会在切入自动控制瞬间出现较大跃变。因此在初始化网络中将积分项清零、上次误差归零是十分必要的。此外，最大输出、最小输出和最大频率、最小频率等约束量的预置，也为后续限幅与安全控制打下基础。

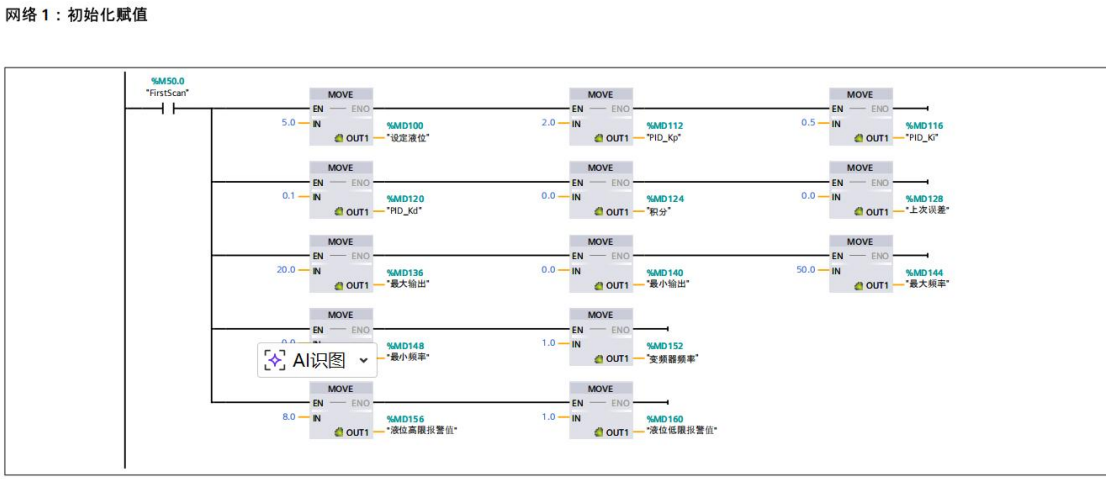


图 4-3 系统初始化

4.2.2 状态仿真调用与调试准备

在 Main 网络 2 中，程序调用状态仿真 [FB3]及其实例数据块状态仿真_DB [DB6]。这说明本系统在设计时充分考虑了无实物条件下的程序验证需求。状态仿真模块可以在水箱、传感器或执行机构尚未完全接入时，通过软件生成液位变化趋势，使主程序其余部分仍然能够按真实工况进行联调。

对于课程设计和实验室环境而言，仿真模块的意义十分突出。学生可在不直接驱动现场设备的条件下，先验证启停逻辑、报警逻辑和参数整定流程是否正确；当逻辑成熟后，再切换到真实硬件，从而降低调试风险、缩短联机时间。因此，将仿真模块放置于主程序前部统一调用，是一种兼顾安全性与开发效率的合理设计。

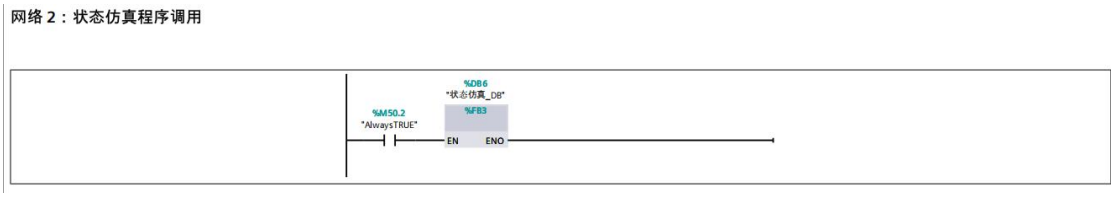


图 4-4 程序状态调用

4.2.3 系统启停与模式切换逻辑

在 Main 网络 3 与网络 4 中，程序完成供水系统的启动与停止控制。启动逻辑规定：当按下启动按钮且三台泵中任意两台未同时故障时，系统允许进入运行状态；停止逻辑则规定：当按下停止按钮、按下急停按钮，或三台泵同时故障时，系统立即停止运行，并复位自动启动相关标志位及各泵工频/变频状态位。该逻辑体现了典型的故障优先和安全停机原则。

在网络 5 中，程序通过手动模式按钮和自动模式按钮切换手自动模式变量 MW1042。其中，手动模式一般写入 0，自动模式写入 1。这一模式量在后续多个网络中被反复引用，用于决定到底执行手动控制逻辑还是自动控制逻辑。通过将模式状态集中存放在字变量中，不仅便于 HMI 显示，也便于在不同功能块之间统一使用。

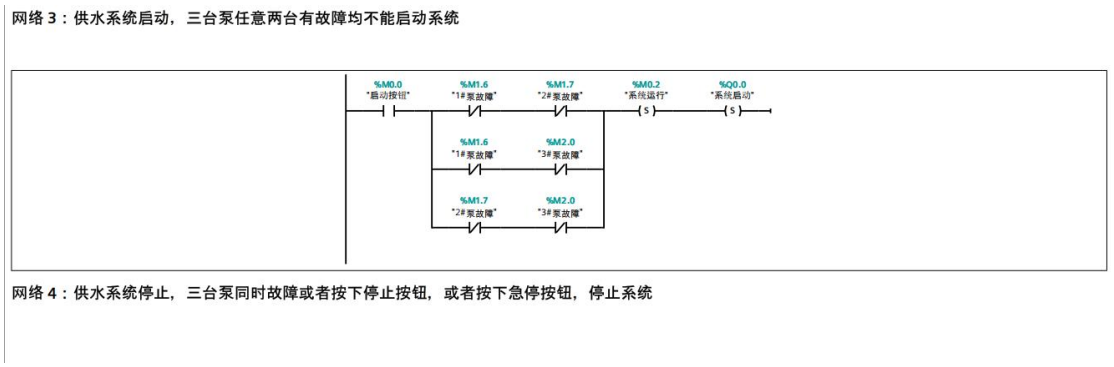


图 4-5 供水启停控制

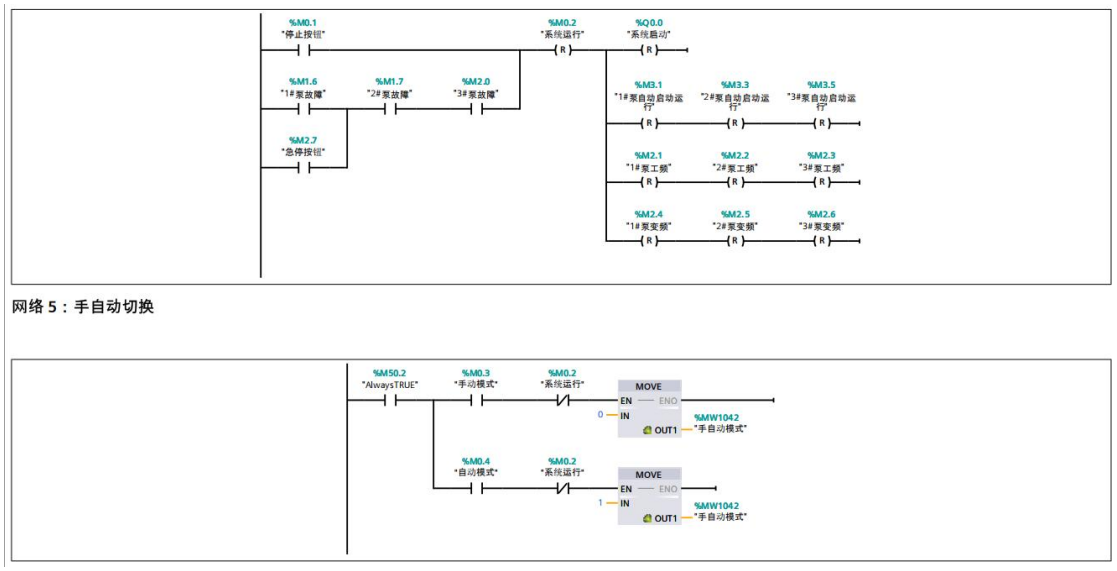


图 4-6 启停切换手动

4.2.4 手动控制与输出驱动逻辑

在网络 6 中，程序完成手动模式下三台泵的单独启停控制。每台泵都具备独立的手动启动按钮、手动停止按钮和故障判断条件，手动逻辑最终驱动对应的“某泵手动启动运行”位。当系统处于手动模式且某台泵未故障时，操作人员可直接控制该泵投入或退出运行。此设计有利于设备检修、点动试验和故障排查。

在网络 11、网络 12、网络 13 中，主程序分别对 1#、2#、3#泵执行最终输出控制。每个输出网络都综合考虑了该泵的手动启动状态、自动启动状态和运行状态指示，并驱动实际输出点与 HMI 动画位。这样做的优点是将“命令产生”和“物理输出”分离开来，前级逻辑只决定泵是否应该运行，后级逻辑负责最终落地到输出端子，提高了程序可读性和维护性。

网络 6：手动模式启动 3 台泵

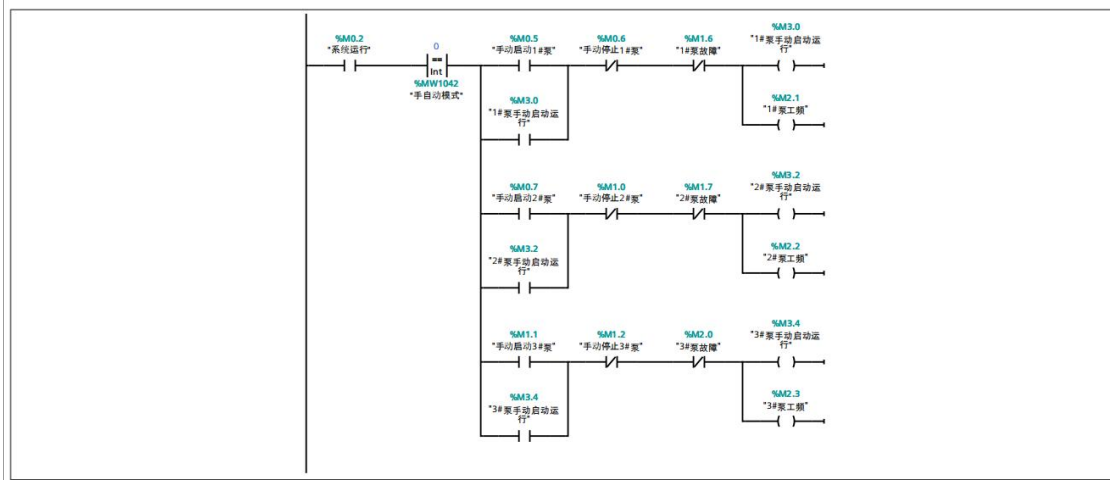
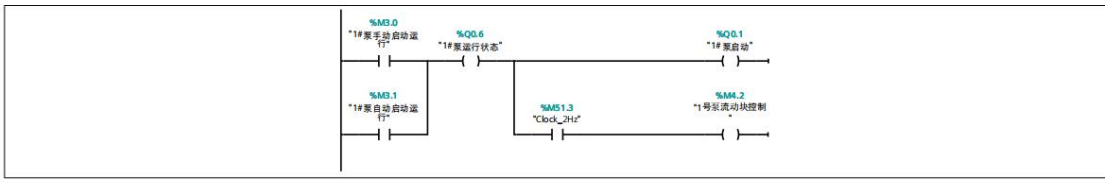
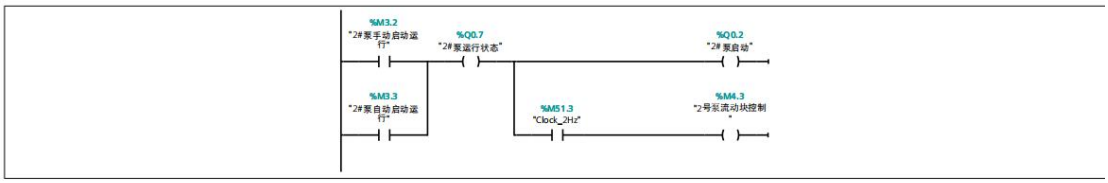


图 4-7 手动启动泵程序

网络 11：1 号泵输出控制



网络 12：2 号泵输出控制



网络 13：3 号泵输出控制

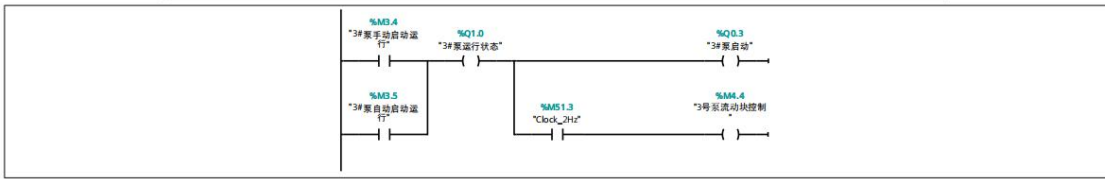


图 4-8 泵输出控制

4.2.5 报警与运行时间处理

主程序网络 14 中连续调用三次设备运行时间 [FB2]功能块，分别对应三台泵的累计运行时间统计。每台泵都配有独立实例数据块，用于记录运行天、时、分、秒以及清零状态。网络 15 进一步把累计运行时间换算为分钟，这为后续 HMI 显示、设备维护和泵组轮换提供了统一依据。

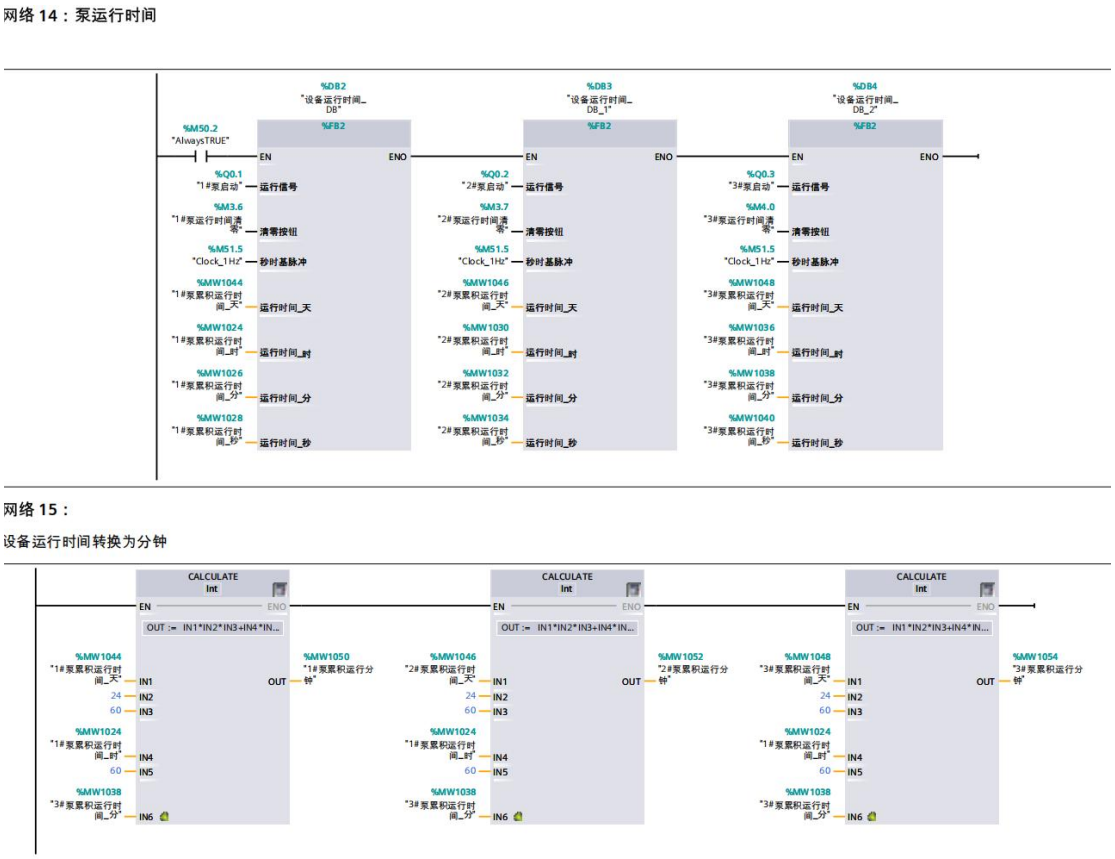


图 4-9 泵运行时间

在网络 16 和网络 17 中，程序根据反馈液位与高低限报警值比较结果，分别驱动高液位报警灯和低液位报警灯。此类报警虽结构简单，但在恒液位控制中具有十分重要的保护意义：高液位报警可提示补水过量或出流不足，低液位报警则可提示供水不足、泵能力不足或传感器异常。通过在主程序末端集中处理报警，也有利于保证所有前级计算均完成后再进行状态判定，减少误报。

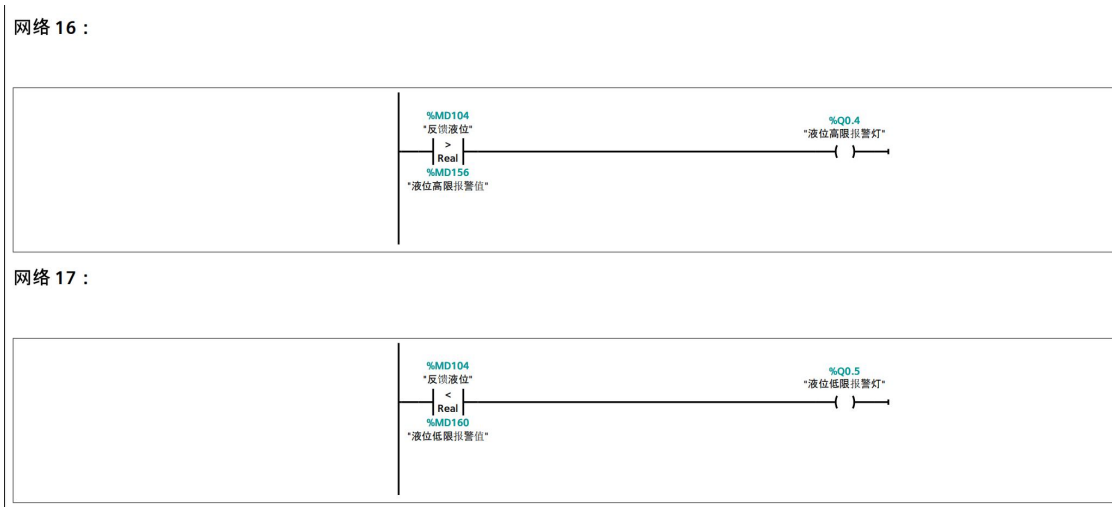


图 4-10 限位报警

4.3 PID 液位反馈控制设计

4.3.1 PID 控制块接口与控制任务

程序归档稿显示，PID 控制 [FB1]采用 SCL 语言编写，其输入参数包括设定值、实际值、Kp、Ki、Kd 和采样周期 DT，输出为控制量输出。在主程序网络 7 中，Main 将设定液位、反馈液位以及 PID 参数送入该功能块，计算结果存入控制输出。由此可见，该功能块承担的是系统核心的液位闭环调节任务。

对于恒液位对象而言，设定值代表期望液位高度，实际值代表当前液位反馈，二者之间的偏差通过 PID 算法转化为执行需求。该执行需求并不直接对应某一个单独执行器，而是作为后续“变频调节 + 泵组切换”的共同依据。因此，FB1 在整个系统中扮演的是“连续调节器”的角色，它输出的是一个反映当前供水需求强弱的连续控制量。

4.3.2 PID 算法实现机理

从 SCL 源码可见，PID 控制 [FB1]的核心计算过程包括四步：首先计算误差误差= 设定值 - 实际值；其次对积分项执行更新，即积分= 积分 + 误差 DT；然后计算微分项，即导数= (误差 - 上次误差) / DT；最后依据公式输出= Kp 误差 + Ki 积分 + Kd 导数得到控制输出，并将当前误差写回“上次误差”供下一次扫描使用。

这一实现方式属于标准位置式 PID 结构，具有表达清晰、便于教学的特点。由于液位系统存在一定惯性，比例项可提供快速纠偏能力，积分项可消除稳态误差，微分项则主要用于改善动态过程、抑制偏差变化过快时的超调。从程序结构

上看，该控制器保留了较完整的 PID 形式，方便后续根据实际对象特性进行参数整定。

4.3.3 参数设定与控制方向分析

在初始化网络中，系统给出了 Kp、Ki、Kd 和采样时间的初始值。结合主程序中的变量关系可以判断：当反馈液位低于设定液位时，误差为正，PID 输出增大；而后续逻辑会根据控制输出提升变频器频率或增加泵的投入台数，从而提高进水能力、抬升液位。这说明本系统的控制方向与“液位低则增大补水能力”的工程要求一致。

在实际整定过程中，建议优先采用“先 P 后 PI 再 PID”的方法。先通过较小比例增益观察液位响应方向是否正确，再逐步提高比例系数以增强响应速度；若存在静差，则适当增加积分作用；若系统出现较大超调或波动，则可引入适量微分作用或增加滤波。由于液位过程噪声通常较小但惯性较大，实际工程中常以 PI 控制为主，微分项仅作为辅助。

4.3.4 PID 输出与限幅改进分析

从 FB1 源码可见，程序中原本预留了输出限幅语句，但对应的 IF 判断语句已被注释掉，并未真正参与计算。这说明当前 PID 块虽然具备完整的误差、积分和微分运算，但在控制输出过大或过小时，仍主要依赖后续主程序中的频率限幅网络进行约束，而不是在 PID 内部直接进行抗饱和处理。

这一设计在教学场景中便于观察原始 PID 计算结果，但从工程控制角度看，若执行机构已达到物理上限而积分项仍继续累加，可能出现积分饱和，导致系统恢复变慢。因此，优化设计时应在论文中明确指出：后续工程应用中可在 PID 块内部加入输出限幅、积分分离和积分抗饱和处理，以提高系统动态性能与稳定性。即便当前归档程序未完全实现该部分，在论文设计说明中也应将其作为程序优化方向写明，以体现工程思维的完整性。

					API 可写				
Input									
设定值	Real	0.0	非保持	True	True	True	False		
实际值	Real	0.0	非保持	True	True	True	False		
Kp	Real	0.0	非保持	True	True	True	False		
Ki	Real	0.0	非保持	True	True	True	False		
Kd	Real	0.0	非保持	True	True	True	False		
DT	Real	0.0	非保持	True	True	True	False		
Output									
输出	Real	0.0	非保持	True	True	True	False		
InOut									
Static									
误差	Real	0.0	非保持	True	True	True	False		
导数	Real	0.0	非保持	True	True	True	False		
Temp									
Constant									

```
0001 // 计算误差
0002 #误差 := #设定值 - #实际值;
0003
0004 // 积分项更新
0005 "积分" := "积分" + #误差 * #DT;
0006
0007 // 微分项计算
0008 #导数 := (#误差 - "上次误差") / #DT;
0009
0010 // PID 控制输出
0011 #输出 := (#Kp * #误差) + (#Ki * "积分") + (#Kd * #导数);
0012
0013 // 限制输出范围
0014 //IF #输出 > "最大输出" THEN
0015 // #输出 := "最大输出";
0016 //ELSIF #输出 < "最小输出" THEN
0017 // #输出 := "最小输出";
0018 //END_IF;
0019
0020 // 更新上次误差
0021 "上次误差" := #误差;
```

符号	地址	类型	注释
"积分"	%MD124	Real	
"上次误差"	%MD128	Real	
#DT		Real	
#Kd		Real	
#Ki		Real	
#Kp		Real	
#导数		Real	
#设定值		Real	
#实际值		Real	
#输出		Real	
#误差		Real	

图 4-11 pid 控制

4.4 自动启泵与变频协同控制设计

4.4.1 自动启泵控制块的功能定位

在本系统中，单纯依赖 PID 连续输出并不足以直接驱动三台泵的全部运行逻辑，因为泵组系统不仅要考虑液位偏差，还要考虑泵台数投切、工频/变频切换、故障避让和启泵延时等顺序控制问题。因此，系统专门设置了自动启泵控制[FB4]，用来将液位控制需求进一步转化为泵组运行策略。

该功能块的主要任务包括：根据反馈液位和运行状态决定是否启用 1#泵；在液位长时间未恢复到设定要求时，按顺序投入 2#泵和 3#泵；在新增泵投入后，将前一台泵切换到工频运行，从而形成“前级工频、后级变频”的分层供水方式。这样的设计既保留了变频调节的连续性，又充分利用多泵并联系统的扩容能力。

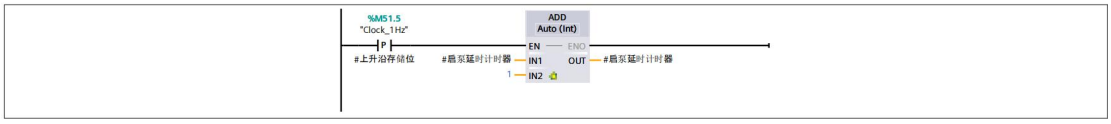
4.4.2 启泵延时与分级投入逻辑

从自动启泵控制 [FB4]的网络 1 可见，系统利用 Clock_1Hz 脉冲对“启泵延时计时器”进行累加，实现以秒为单位的延时判据。网络 2 中规定：当系统运行、处于自动模式、反馈液位低于阈值且三台泵均未运行时，首先投入 1#泵，并将其置于变频运行状态，同时把启泵延时计时器清零。

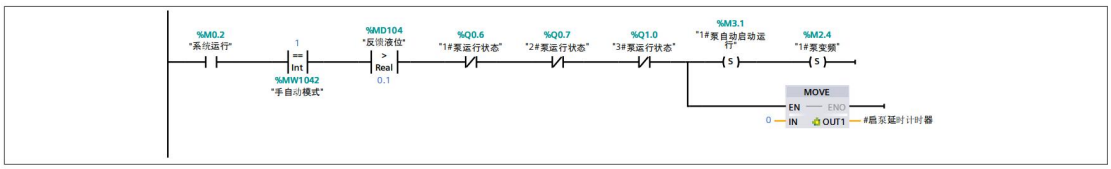
网络 3 进一步规定：若 1#泵投入后运行超过 60 秒，且液位仍低于“设定液位减去一定阈值”的条件，则将 1#泵切换到工频运行，同时启动 2#泵并使其处于变频运行状态，再次复位计时器。网络 4 采用完全相同的思想，在 2#泵投入后若液位恢复效果仍不理想，则将 2#泵切换工频，并启动 3#泵变频运行。网络 5 则表示：当第三台泵投入并运行超过限定时间后，如果液位仍未达到要求，则 3#泵也切换为工频运行，实现三台泵全部投入的最大供水能力模式。

这种“逐级投入 + 延时判断 + 先变频后工频切换”的控制策略符合恒液位系统的工程特点。它避免了系统在短时扰动下立即大量启泵，减少了泵组频繁投切；同时又能在实际负荷持续增大时逐步扩展供水能力，保证液位稳定在合理范围内。

网络 1：启泵延时计时器累加

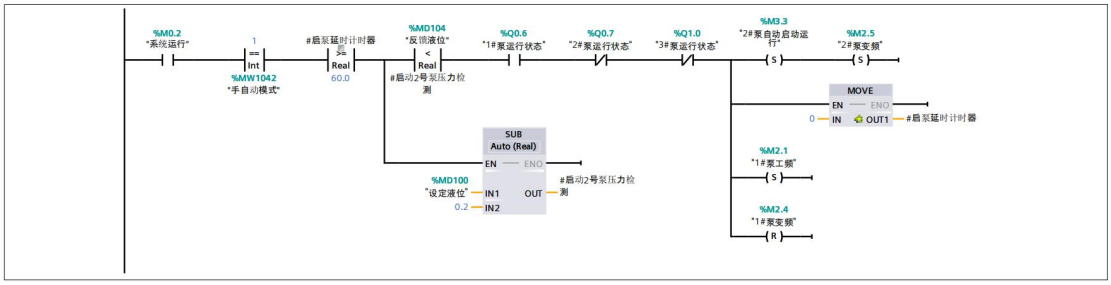


网络 2：根据 PID 的输出控制启动泵，默认启动第 1 台泵，同时将启泵计时器复位



网络 3：检查第一台泵的工作状况

如果在超过一分钟第一台泵压力不能达到设定值，将第一台泵切换到工频运行，同时启动第二台泵，将启泵计时器复位



网络 4：检查第二台泵的工作状况

如果在超过一分钟第二台泵压力不能达到设定值，将第二台泵切换到工频运行，同时启动第三台泵，将启泵计时器复位

图 4-12 泵启动延时

4.4.3 故障切换与泵组冗余设计

在 FB4 的后续网络中，程序对 1#、2#、3#泵故障分别进行了处理。若某台泵出现故障，则程序会根据其余泵的故障状态和当前运行状态，自动调整对应的“自动启动运行”位，从而尽可能利用剩余健康泵维持系统运行。这体现了泵组并联系统中典型的冗余思想：单台泵故障不应立即导致整个系统失控，而应通过逻辑切换保持最低限度的供水能力。

从可靠性设计角度看，该逻辑能够显著提高系统在部分设备失效时的可用性。不过在论文表述中应指出，当前程序的故障切换更多体现为“故障避让”和“剩余泵接替”，尚未完全形成基于累计运行时间的智能轮换顺序。若后续进一步优化，可将设备运行时间与自动启泵逻辑耦合，实现优先启动累计运行时间较短的泵，从而进一步改善多泵均衡磨损效果。

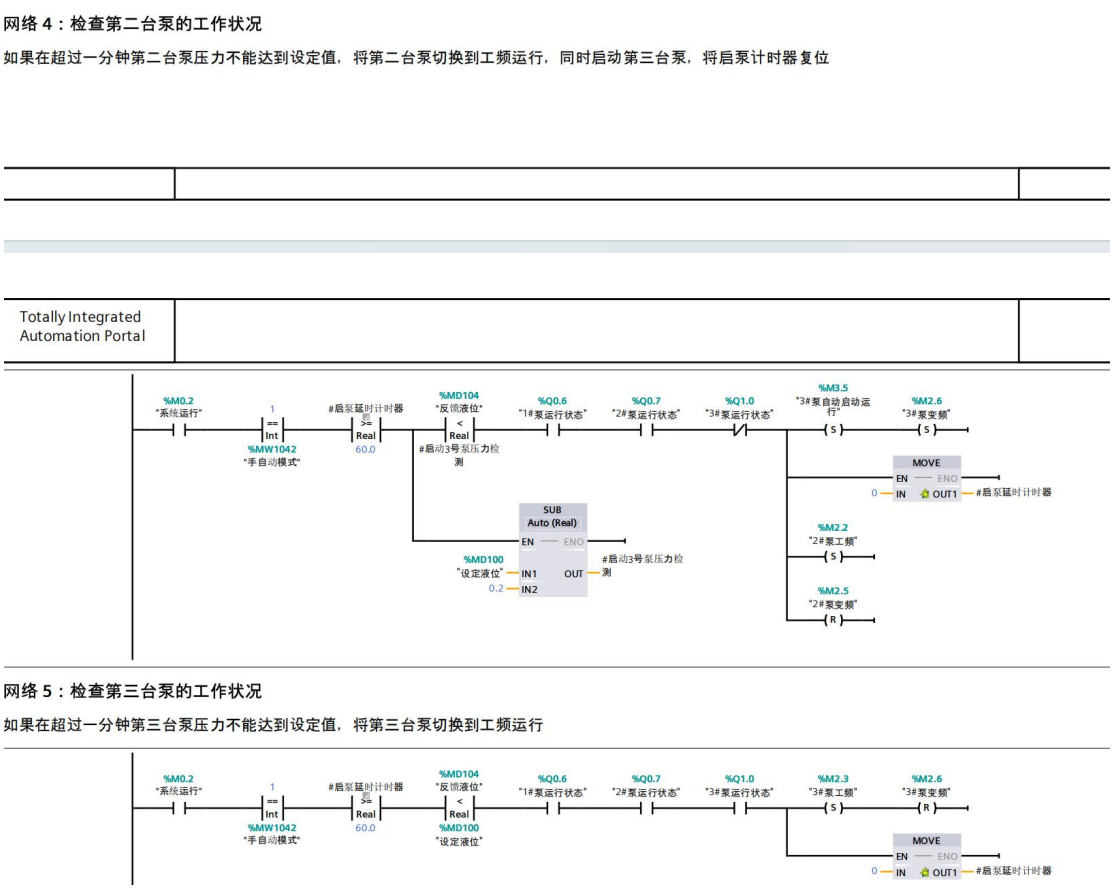


图 4-13 泵健康检测

4.4.4 变频器频率计算与输出限幅

在主程序网络 8 和网络 9 中，系统根据 PID 输出对变频器频率进行换算，

并通过 LIMIT 指令将频率限制在 0~50Hz 范围内。程序中还引入了与反馈液位相关的经验计算式，用于对频率与液位关系进行线性或准线性修正。这说明该系统并非简单地将 PID 输出原样输出给变频器，而是根据实验装置特性进行了二次换算。

这种设计体现了“控制输出工程化”的思想。理论上的 PID 输出只是一个无量纲的调节量，而实际变频器需要的是有明确物理意义的频率给定值。因此，通过计算模块将控制输出转换为实际频率，并在最终阶段进行限幅处理，可有效避免超频、欠频以及不合理输出对设备造成冲击。对于恒液位供水系统而言，这一部分是连接算法层与执行层的重要桥梁。

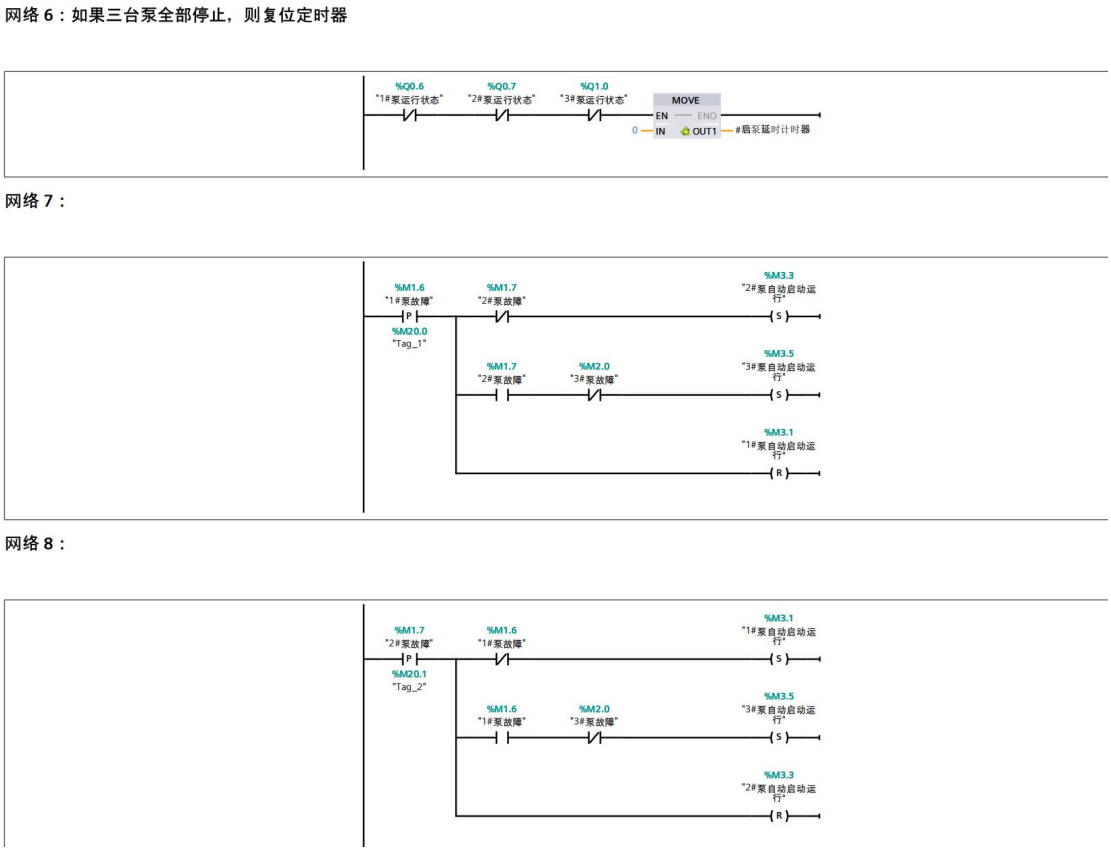


图 4-14 自动启泵控制及变频协同网络

程序块

自动启泵控制_DB [DB5]

自动启泵控制_DB 属性							
常规							
名称	自动启泵控制_DB	编号	5	类型	DB	语言	DB
编号	自动						
信息							
标题		作者		注释		系列	
版本	0.1	用户自定义 ID					

名称	数据类型	起始值	保持	从 HMI/OPC UA/Web API 可访问	从 HMI/OPC UA/Web API 可写	在 HMI 工程组态中可见	设定值	监控	注释
Input									
Output									
InOut									
Static									
泵 1 超时标志位	Bool	false	False	True	True	True	False		
泵 2 超时标志位	Bool	false	False	True	True	True	False		
泵 3 超时标志位	Bool	false	False	True	True	True	False		
启泵延时计时器	Int	0	False	True	True	True	False		
上升沿存储位	Bool	false	False	True	True	True	False		
启动 2 号泵标志位	Bool	false	False	True	True	True	False		
启动 3 号泵标志位	Bool	false	False	True	True	True	False		
启动 2 号泵压力检测	Real	0.0	False	True	True	True	False		
启动 3 号泵压力检测	Real	0.0	False	True	True	True	False		

图 4-15 自动启泵控制及变频协同网络

4.5 设备运行时间累计与维护支持设计

4.5.1 运行时间统计原理

为实现对泵组运行状态的量化管理，本系统设置了设备运行时间 [FB2]功能块，用于在每台泵投入运行期间累计其工作时长。程序中以 Clock_1Hz 作为秒脉冲输入，每当检测到泵运行信号有效且秒脉冲到来时，运行时间的“秒”变量加 1；当秒达到 60 后进位到“分”，分达到 60 后进位到“时”，时达到 24 后进位到“天”。这一实现方式逻辑清晰、资源消耗低，符合 PLC 定时累加的一般做法。

由于三台泵分别调用了独立实例数据块，因此每台泵的累计运行时间可独立保存，不会互相覆盖。这为后续设备检修、运行分析以及轮换控制提供了可靠依据。相比仅用 HMI 显示运行状态而不进行累积统计的简化方案，本设计更符合实际工程设备管理需求。

4.5.2 时间换算与工程应用意义

在主程序网络 15 中，程序将各泵的“天、时、分”进一步换算为统一的累计运行分钟数，便于进行横向比较。例如，当需要判断哪一台泵累计工作时间最长或最短时，使用统一的分钟量显然比直接比较分散的天、时、分字段更方便。这样既利于 HMI 显示，也便于后续加入自动轮换算法。

从设备维护角度看，累计运行时间统计具有明显工程价值。泵、电机、接触器和热继电器等元件的维护周期往往与运行小时数密切相关。通过实时统计三台

泵的累计工作时间，可在 HMI 中设置维护提示阈值，当某台泵超过建议维护时间时发出保养提醒，避免因长期超期运行导致故障率上升。

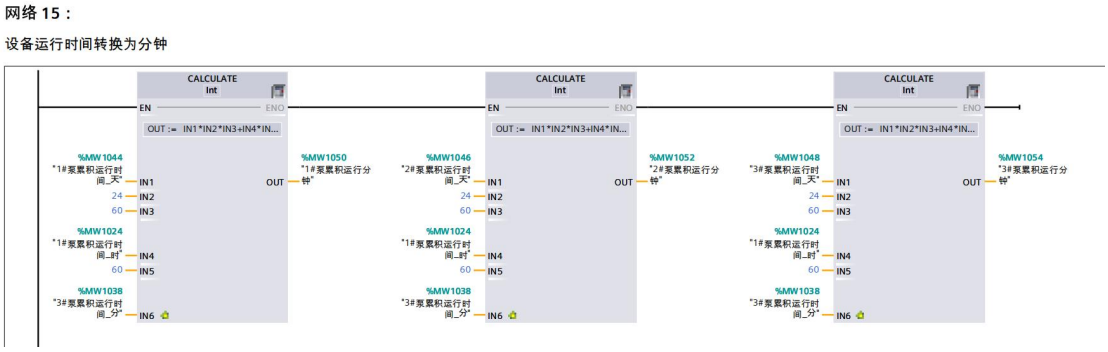


图 4-16 泵时间转换

4.5.3 清零权限与数据管理

FB2 中还设计了清零按钮输入，用于在设备检修或维护后将累计时间归零。这一功能虽然简单，但在实际应用中必须与权限管理结合使用。若任何操作人员都可以任意清零运行时间，将导致维护记录失真，影响设备寿命管理。因此在论文中应明确说明：运行时间清零操作宜由维护级或管理员级权限执行，并应同步在 HMI 或纸质记录中保留维护日志。

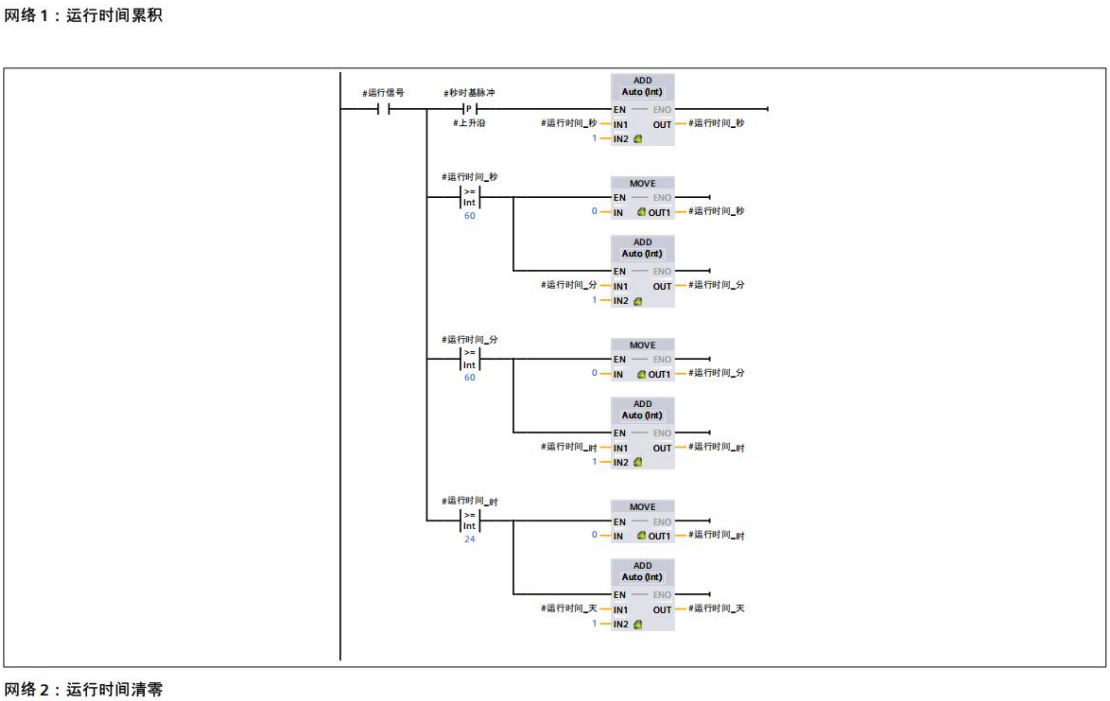


图 4-17 时间累计

4.6 状态仿真与报警保护设计

4.6.1 状态仿真模块的程序作用

状态仿真 [FB3]主要用于模拟泵启动后液位上升、停机后液位下降以及系统停止时频率与液位缓慢回落的过程。从程序内容看，该模块通过加法、减法和限幅运算对反馈液位 MD104 进行处理，使其在不同泵投入数量下按不同速率变化。程序同时将泵启动命令映射为运行状态信号，从而在无实物设备时也能观察完整的控制流程。

这一模块虽然不直接参与最终工程运行，但在系统开发、课程实验和论文答辩中意义较大。一方面，它可证明程序的整体逻辑具有可运行性；另一方面，它能帮助设计者在不接触动力回路的情况下先验证 PID、启泵和报警等关键功能，显著提高开发效率和调试安全性。

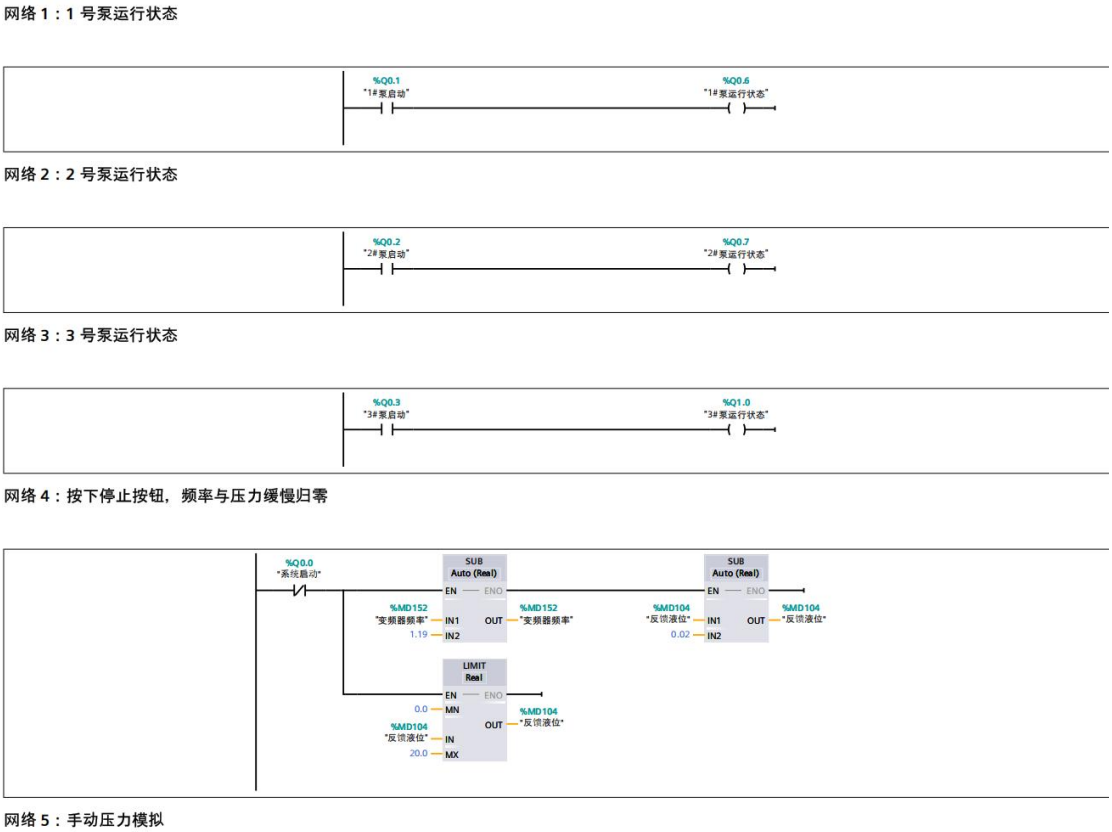


图 4-18 泵状态检测

4.6.2 高低液位报警逻辑

主程序最后两个网络分别通过“反馈液位 > 高限报警值”和“反馈液位 < 低限报警值”触发高液位报警灯与低液位报警灯。该报警逻辑实现简单直接，适合

教学系统和中小型工程装置使用。当液位超过高限时，可提醒操作人员检查出流是否不足或泵是否过量投入；当液位低于低限时，可提醒检查补水能力、泵运行状态或传感器信号是否异常。

如果系统今后应用于更高可靠性场合，则可在现有基础上继续扩展高高液位、低低液位、传感器断线、反馈变化率异常和泵故障联锁停机等高级报警策略。但从本项目给出的程序来看，当前已经建立了较清晰的基础报警框架，能够满足课程设计和实验平台对安全提示的基本要求。

4.6.3 安全保护逻辑的程序体现

除了液位报警外，系统在主程序和自动启泵控制块中还通过多处逻辑体现了安全保护思想。例如，急停按钮可直接触发系统停机；三台泵同时故障时系统禁止继续运行；单台泵故障时通过故障位切断其参与自动控制的资格；停止系统时程序会同步复位自动启动位以及工频/变频状态位，避免系统再次启动时产生残余命令。这些措施共同构成了软件层面的安全保护链。

在论文撰写时，应强调恒液位控制系统的安全性不仅依赖于控制算法本身，更依赖于“启停联锁 + 故障隔离 + 报警提示 + 输出复位”这一整套逻辑机制。只有在这些保护逻辑完备的前提下，PID 和多泵控制才具备实际应用价值。

网络 5：手动压力模拟

Totally Integrated Automation Portal

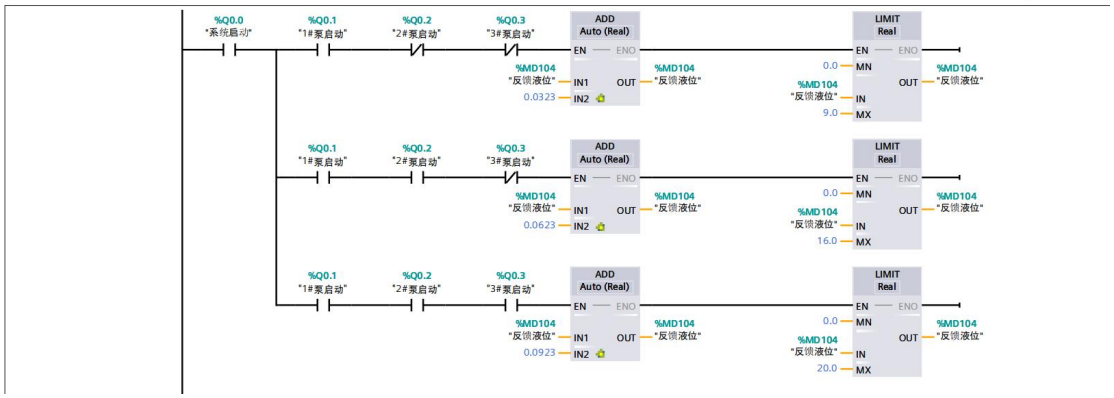


图 4-19 状态仿真与报警网络

4.7 本章小结

本章对恒液位控制系统的软件实现进行了系统分析。程序整体采用模块化结构，以 Main [OB1]为调度核心，以 PID 控制 [FB1]实现液位闭环调节，以自动启泵控制 [FB4]完成多泵顺序投入与工频/变频协同，以设备运行时间 [FB2]实现运行时间累计，以状态仿真 [FB3]支持离线联调和教学验证。由此形成了一个集连续控制、顺序控制、状态监视和报警保护于一体的完整 PLC 软件体系。

从程序实现效果看，该系统不仅能够完成恒液位基本控制任务，而且充分考虑了多泵切换、故障处理、参数初始化、调试辅助和维护统计等工程问题，具有较好的实用性和教学演示价值。与此同时，针对 PID 内部抗饱和、运行时间轮换优化和报警等级扩展等方面，仍存在进一步完善空间，这也为后续系统优化和工程升级提供了明确方向。

第 5 章 HMI 人机界面与通信设计

5.1 触摸屏硬件与项目概况

5.1.1 TP1900 Comfort

TP1900 属宽屏 Comfort 系列，分辨率与色彩表现适合呈现工艺流程、趋势曲线与多点触摸操作。面板具备以太网口，可与 S7 PLC 建立 S7 OPC UA 方式连接依实际组态版本而定。

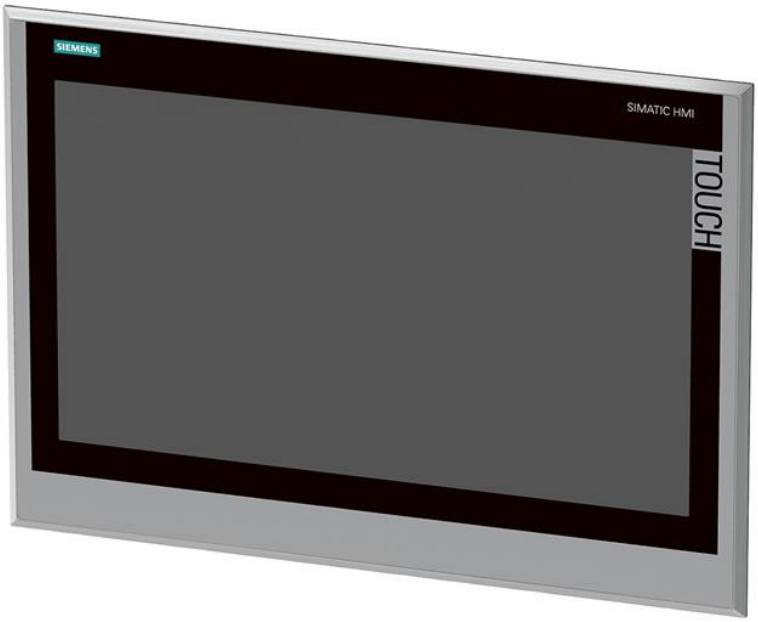


图 5-1 TP1900 触摸屏

5.1.2 运行时项目名称

该名称在仿真器实际运行时显示，有助于现场人员区分多套画面工程。建议在项目属性中同时维护中文描述与内部英文项目名，便于归档。

5.2 画面结构与导航逻辑

5.2.1 主监控画面

以图形化水箱、三台泵、管道与阀件示意；实时数值显示 PV、SP、偏差与泵运行图标；可嵌入液位棒图与短时趋势。

图 5-2 主监控画面运行时项目名

”

5.2.2 泵控制与手动页面

显示各泵启动许可条件、FR 状态、累计时间；手动按钮带闪烁确认二次弹窗，避免误操作。

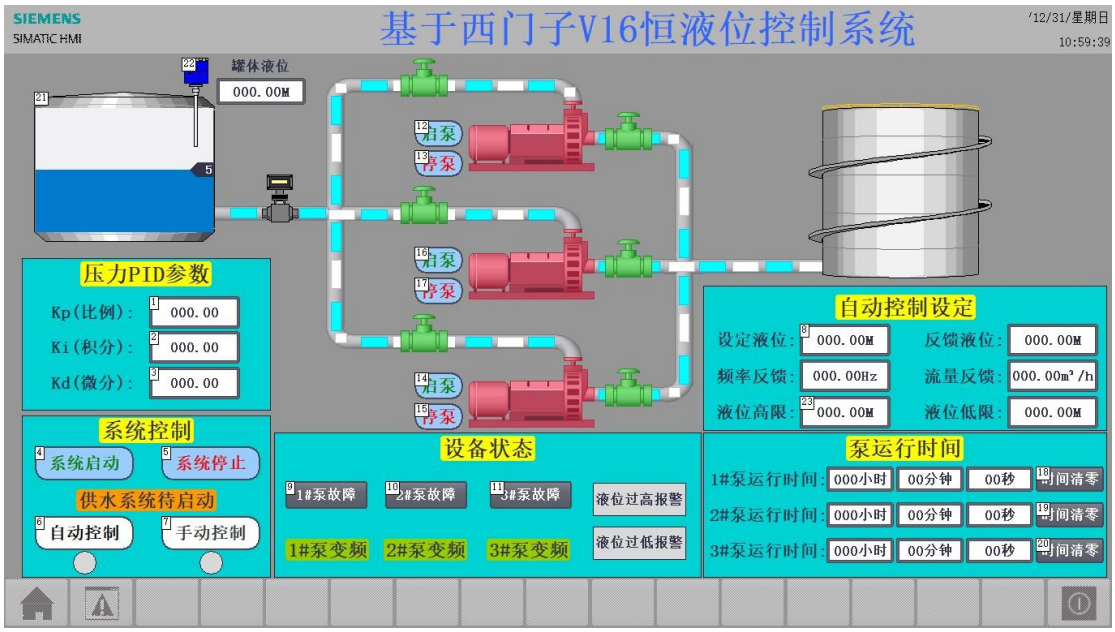


图 5-3 HMI 手动/单泵调试画面

5.2.3 报警与事件页

报警行包含时间、级别、文本、确认状态；可与 PLC Alarm 集成，支持导出打印视授权。

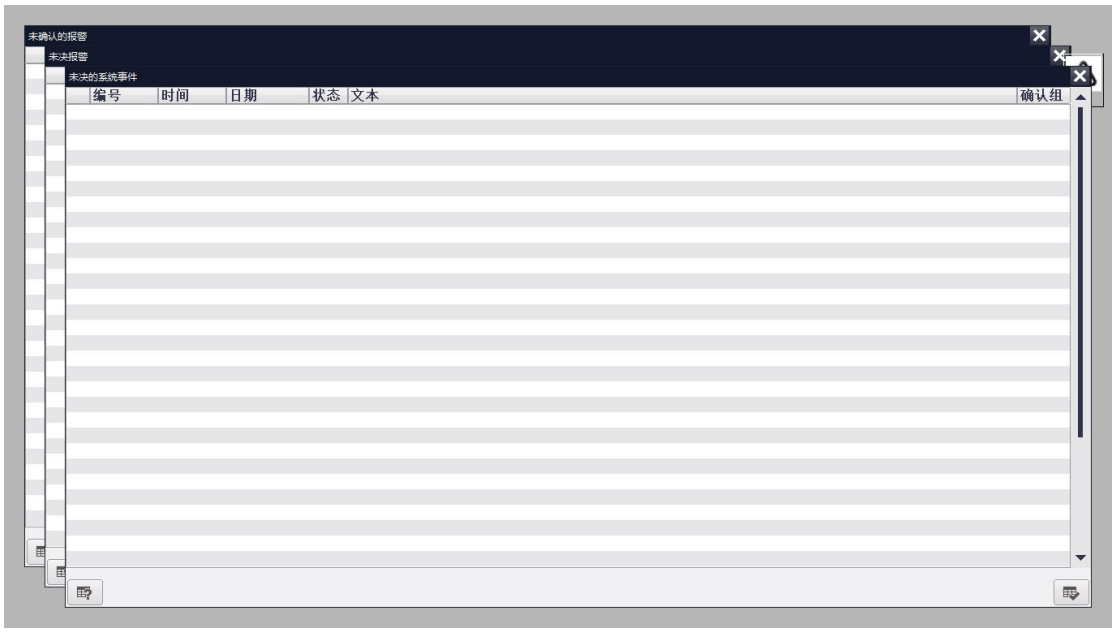


图 5-4 报警/事件列表画面

5.3 用户权限与操作审计

5.3.1 分级口令

操作员仅能启停自动模式与消音；工程师可修改 PID 与切换参数；管理员可清运行时间与配方。口令应定期更换。

5.3.2 关键操作记录

对 SP 修改、手动泵启停、报警复位等生成带时间戳记录，满足教学场景的过程追溯要求。

第 6 章 系统调试

6.1 调试阶段划分与前置条件

6.1.1 绝缘与绝缘电阻检查

系统上电前，需采用兆欧表分别对动力回路与控制回路进行绝缘检测，确保绝缘电阻满足实验与安全规范要求。同时，应完成三相电源相序核对与电机转向确认。若发现泵电机转向与设计要求不一致，应按规范交换任意两相，并在调试记录中注明处理过程与结果，以保证后续闭环试验的可重复性与可追溯性。

6.1.2 单机空载与负载试车

完成绝缘与相序检查后，先进行单机空载试车。建议在拆除泵耦合或关闭相关阀门条件下，点动检查接触器吸合状态、热继电器（FR）动作模拟及反馈信号正确性。空载试验通过后，再逐步进行带载试车，重点观察电机工作电流、泵组振动及异常噪声，确认机械与电气系统均处于可运行状态。

6.2 仿真与无实物调试

6.2.1 状态仿真块联调

在无完整实物条件下，先启用状态仿真模块，将仿真过程变量（PV）接入控制回路。以设定值（SP）阶跃变化为输入，观察 PID 输出变化趋势、自动启泵台数切换时序及相关联锁状态是否与设计逻辑一致。该步骤可在低风险条件下提前发现程序逻辑错误或参数设置不合理问题。

6.2.2 强绑 I/O 测试

利用 PLC 强制表对关键输入输出点进行短时强制，可快速验证 I/O 地址映射、接线连通性及程序响应正确性。测试结束后，必须立即解除全部强制项，并再次核查系统状态，防止残留强制信号影响后续联机闭环调试与试验结果。

6.3 联机闭环整定步骤

6.3.1 模拟量零点和满度校准

联机调试前，应先完成液位模拟量通道的零点与满度校准。通过将水箱液位调整至已知零位和满位，分别记录液位变送器输出值与 PLC 采集值，建立并修正工程量换算系数。该步骤是保证 PID 控制有效性的基础，直接影响后续稳态

误差与动态响应品质。

6.3.2 闭环投运顺序

建议采用“手动预稳—自动切入—小扰动验证—负荷扰动测试”的投运顺序。即先在手动模式下将液位稳定至目标值附近，再切换至自动模式并小步调整 SP，记录系统响应曲线；随后通过出水阀阶跃变化引入扰动，观察系统恢复过程与泵组切换行为，以评估闭环控制综合性能。

第 7 章 结论与展望

7.1 研究工作总结

本文围绕恒液位控制对象，完成了从电气主电路、PLC 软件架构、PID 与启泵协同、运行时间统计到 TP1900 HMI 监控的成套设计叙述，并与西门子 TIA Portal V16 项目中的 PID 控制、自动启泵控制、设备运行时间、状态仿真等程序单元建立清晰对应关系。主电路三台异步电机各自具备 FU/KM/FR 保护链，符合基本电气安全规范。所提出的分段延时与滞环策略对抑制泵频繁启停具有通用参考价值。上述工作已形成可答辩、可归档、可复用的综合训练案例框架，便于在相同硬件条件下开展多轮对比试验。

7.2 不足与改进方向

限于篇幅与实验条件，本文未给出具体泵流量曲线与管网阻力实测数据，因而 PID 与切换参数仍以定性指导为主；后续可补充分段试验数据与数学模型辨识结果。此外，未展开谐波治理、无线远程监测与云端运维等内容。

7.3 展望

可在保留 PLC 总体架构的前提下，引入变频器构成“变频主泵 + 工频辅泵”节能型恒液位供水站；可将报警与关键参数上传至 SCADA 楼宇管理系统；亦可结合预测控制自学整定算法在特定负荷预测场景下进一步降低能耗与液位波动。

7.4 工程经济性

从一次性投资看，三台工频泵加接触器方案相对变频器多机协同更具成本优势，适合课程设计与预算有限的实训室；从全寿命周期看，泵频繁启停会抬升维护成本，本论文强调的延时、滞环与运行时间统计正是在“初期投资”与“运维费用”之间寻求折中。对职业院校而言，同一套装置既可开设液位 PID 实验，也可扩展为顺序控制、通信与 HMI 综合实训，具有良好的设备利用率。对中小企业改造而言，模块化程序块与标准化 I/O 文档可降低后期扩展泵组接入上位机的技术门槛。上述内容不构成严谨财务评价，仅作方案比选时的定性提醒。

致谢

本论文从最初选题、方案设计、实验开展到最终撰写定稿，每一步推进都离不开师长、同窗与家人的鼎力支持，在此谨致以最诚挚的谢意。首先，我由衷感谢我的指导老师。从研究方向的确立到技术路线的梳理，从理论框架的完善到细节内容的推敲，老师都倾注了大量心血，给予了耐心细致的指导。老师严谨务实的治学态度、开阔深入的学术视野以及精益求精的科研精神，不仅为我指明了研究方向，更让我在专业学习与科研思维上得到了全面提升，使我受益终身。同时，衷心感谢学院各位任课教师在大学期间的悉心教导，他们系统讲授的专业知识、分析问题的科学方法以及认真负责的教学态度，为本次论文写作打下了扎实的理论基础，也为我今后的学习与工作树立了良好的榜样。

感谢与我一同求学、并肩前行的同学们和朋友们。在学习与研究过程中，我们相互探讨、彼此鼓励，在遇到难题时共同查阅资料、交流思路，在压力与困惑时相互安慰、携手共进，这段珍贵的同窗情谊让求学之路倍感温暖与充实。最想感谢的是我的家人，他们始终默默付出、无条件支持，用包容与理解为我营造了安心学习的环境，在我遇到困难时给予坚定的鼓励，在我取得进步时给予真诚的肯定，成为我不断前行最坚实的精神支柱。最后，向所有在本研究过程中给予关心、帮助与支持的人们致以深深的谢意，这段难忘的经历将成为我人生中宝贵的财富，激励我在未来的道路上脚踏实地、勇敢前行。

参考文献

[1]信召阳,张晓芳,姚京裕. 基于PLC控制的石化反应罐自动卸料电气系统研究[J].流程工业,2026,(03):77-79.

[2]郝军铭,朱开亮,张敏,等. 基于PLC控制的智能密闭隔氧收油系统开发与应用[J].化学工程与装备,2026,(02):103-105.

[3]童长松,王宇昊,陆凯雷,等. 基于PLC的盐溶液自动补充设备控制系统设计[J].机械设计与制造工程,2026,55(01):53-57.

[4]汪有才,王栋栋,徐金鑫,等. 基于PLC的锻造耐磨球循环水控制系统研究[J].锻压装备与制造技术,2025,60(06):75-78.

[5]张鎏杰. 基于S7-1500 PLC的碱性电解水制氢控制系统[J].电工技术,2025,(24):13-16.

[6]黄亚球,王鹏,余梓敬,等. 基于PLC+4G物联网的一体化污水处理设备设计与验证[J].机电工程技术,2025,54(24):114-119.

[7]于清刚. 西门子控制系统在煤化工水处理系统中的应用[J].自动化应用,2024,65(05):55-57.

[8]靳昌龙. 恒液位自动化控制与物联网模块结合运用研究[J].山东煤炭科技,2023,41(12):157-160.

[9]钟滨. 基于PLC技术的恒压、恒温、恒液位供水控制系统的设计[J].花炮科技与市场,2019,(04):237.

[10]郭夕琴,武建卫,张海红,等. 基于PLC、变频器的恒液位控制系统设计与实现[J].江苏科技信息,2018,35(09):60-62.

[11]陈喆,崔豫泓. 基于PLC的煤粉工业锅炉除氧系统研究与改造[J].洁净煤技术,2016,22(03):90-92.

[12]彭红涛. 基于PID恒液位系统在污水处理中的应用[J].科技创新与应用,2015,(04):112.DOI:10.19981/j.cn23-1581/g3.2015.04.093.

[13]贾华,闫闯. 恒液位污水处理控制系统的设计[J].内蒙古科技与经济,2014,(12):75-76.

[14]李方园. S7系列PLC电气控制设计与应用第2讲基于S7-200的恒液位控制系统[J].自动化博览,2013,30(01):68-69.

[15]濮阳槟. 基于 PLC 的水泵机组节能设计[J].科技视界,2012,(23):234-235.

[16] 胡晓莉,江杰,商仕金.恒液位自动控制系统的实现[C]//Intelligent Information Technology Application Association.Proceedings of2011 International Conference on Software Engineering and Multimedia Communication （SEMC2011 V2）.内蒙古科技大学信息工程学院;,2011:208-210.

[17] 胡晓莉,江杰,商仕金.恒液位自动控制系统的实现[C]//International Communication Sciences Association, Hong Kong.Proceedings of 2010 International Conference on Broadcast Technology and Multimedia Communication(Volume 2).内蒙古科技大学信息工程学院;,2010:204-206.

[18]周凤银,杨芳,沈庆. 变频器及 PLC 在恒液位控制中的应用[J].冶金动力,2008,(06):65-67.

[19] 濮阳槟,李伟. 污水处理厂水泵机组的节能设计[J].电工技术,2004,(04):39-40.

[20]韩建科,梁昭湖,王晓斌. 工业循环水计算机控制系统[J].仪器仪表标准化与计量,2003,(04):29-31.