

摘要

无油空压机在医药、食品、精密电子及实验室等对压缩空气品质要求严格的场合应用广泛,排气压力与温度、加载与卸荷时序以及故障响应须得到可靠控制。传统继电器控制存在接线复杂、参数整定不便、联锁逻辑扩展困难等不足,难以满足工艺与安全一体化管理需求。

针对上述问题,本课题以西门子 S7-1214C 型可编程逻辑控制器为核心,对无油空压机控制系统进行设计与论述。在分析无油压缩工艺特点与现场约束的基础上,阐述电气主电路中空压机主电机与冷却风机的供电与保护方案,完成 PLC 本体及 SM 1234 模拟量扩展模块选型,归纳数字量与模拟量输入输出与现场器件的对应关系;在 TIA Portal 集成环境中以梯形图语言构建主程序 OB1,实现上电初始化、手自动模式管理、顺序启停、加载与卸荷电磁阀协同、排气压力与排气温度模拟量标定,以及超压、超温、低压和电机过载等故障检测与复位;通过自定义功能块实现排气压力 PID 调节并与变频器频率给定联动,辅以数据变化检测以改善调节通道稳定性;人机界面基于 TP1200 Comfort 触摸屏完成过程监视、参数管理与报警组态。

结果表明,所设计方案结构清晰、联锁完备、人机参数可视化程度较高,能够满足无油空压机在变工况条件下安全运行与调节的需要,对同类机电设备自动化改造具有参考价值。全文论述与工程设计所依据的主电路、可编程控制器接线图、控制程序及人机界面等成套技术资料相互印证。

关键词: 无油空压机; 可编程逻辑控制器; 电气主电路; PID 控制; 人机界面; 故障联锁

Abstract

Oil-free air compressors are widely used in pharmaceutical, food, precision electronics and laboratory applications where compressed air quality is critical. Discharge pressure and temperature, loading and unloading sequences, and fault response must be controlled reliably. Conventional relay-based control suffers from complex wiring, difficult parameter tuning, and limited scalability of interlocking logic, and it is inadequate for integrated process and safety management.

To address these issues, a control system for an oil-free compressor is designed and discussed with a Siemens S7-1214C programmable logic controller as the core. Based on an analysis of oil-free compression characteristics and site constraints, the main-circuit scheme for the compressor motor and the cooling-fan motor is presented, including protection devices. The PLC and SM 1234 analog module are selected, and digital and analog I/O mapping to field devices is summarized. In the TIA Portal integrated environment, the main OB1 program in ladder logic implements power-on initialization, automatic and manual modes, sequenced start and stop, coordination of intake, load and unload solenoid valves, scaling of discharge pressure and temperature, and fault detection for overpressure, overtemperature, low pressure and motor overload with reset logic. Custom function blocks realize PID pressure control linked to the variable-frequency drive frequency setpoint, assisted by a data-change detection routine. The human-machine interface on a TP1200 Comfort panel provides process monitoring, parameter management, alarm configuration, and user management.

The results show that the proposed design has a clear structure, complete interlocks, and a high degree of parameter visibility on the HMI, and that it can meet the requirements for safe operation and regulation under varying conditions. The work may serve as a reference for similar automation retrofits. The exposition is consistent with the engineering package of main-circuit drawings, PLC wiring diagrams, control software, and HMI configuration.

Key Words: oil-free air compressor; programmable logic controller; electrical main circuit; PID control; human-machine interface; fault interlock

目录

摘要	1
Abstract	2
第 1 章 绪论	7
1.1 研究背景与问题提出	7
1.1.1 无油空压机的工程地位与应用场景	7
1.1.2 传统继电器控制的局限与可编程控制器技术路线	7
1.2 研究意义	8
1.2.1 对设备安全与工艺稳定性的意义	8
1.2.2 对运维成本与参数可迭代性的意义	8
1.3 国内外研究与应用现状	9
1.4 论文章节结构	10
第 2 章 控制系统需求分析与方案论证	11
2.1 无油压缩工艺特点与运行约束	11
2.1.1 无油结构机理简述	11
2.1.2 温度、冷却与联锁的耦合关系	11
2.2 供气回路与加载/卸荷概念	12
2.3 控制功能需求分解	13
2.3.1 模式管理与启停管理	13
2.3.2 顺序控制与模拟量采集	13
2.3.3 闭环调节与故障管理	13
2.3.4 人机交互需求	14
2.4 控制策略比较与选型	14
2.5 设计边界、假设与评价指标	15
2.5.1 设计边界与假设	15
2.5.2 评价指标建议	15
2.6 热力过程、后处理与仪表接口的补充讨论	15
2.6.1 压缩热与报警阈值的工程含义	15
2.6.2 后处理装置对控制回路的影响	15

2.6.3 振动、噪声与信号品质	15
2.6.4 供气波动与生产节拍	16
2.6.5 仪表专业接口清单	16
2.7 现场传感器与仪表选型	16
2.7.1 排气压力变送器	16
2.7.2 排气温度检测元件	17
2.7.3 压力开关与开关量传感器	18
2.7.4 信号与 PLC 模拟量模块匹配要点	18
2.7.5 选型汇总与安装要求	19
第 3 章 电气主电路与 PLC 控制系统硬件设计	20
3.1 电气主电路设计	20
3.1.1 主回路组成	20
3.1.2 接触器与热继电器的配合原则	21
3.1.3 控制电源与 PLC 输出的接口	21
3.2 安装工艺、接地与电气安全	21
3.2.1 图纸阅读、端子与线号	21
3.2.2 电缆、接地与等电位	21
3.2.3 柜内热管理与备件互换性	22
3.3 PLC 与扩展模块选型及 I/O 配置	22
3.3.1 CPU 与 SM 1234 模拟量扩展模块	22
3.3.2 数字量输入输出与现场器件	23
3.3.3 模拟量通道与工程换算思路	23
3.4 机柜布置、通信与供电	24
3.4.1 布线工艺要点	24
3.4.2 工业以太网与 OPC UA 配置	24
3.4.3 供电容量、滤波与安全输入	24
第 4 章 PLC 控制程序设计	25
4.1 软件架构与程序块划分	25
4.2 初始化与系统启停逻辑	26

4.2.1 首次扫描与输出默认安全态	26
4.2.2 允许运行条件与停止按钮处理	26
4.3 急停、故障复位与手自动切换	26
4.4 排气压力与排气温度的模拟量标定	27
4.5 自动启动与停机步骤链	27
4.5.1 启动步骤寄存器 MW60 与定时确认	27
4.5.2 停机步骤寄存器 MW62 与延时序列	28
4.6 加载、卸荷与变压/恒压区控制	29
4.7 故障检测、汇总与停机触发	30
4.8 参数初值装载与内部变量	31
4.9 PID 压力调节与数据变化检测	32
4.9.1 PID 压力调节功能块	32
4.9.2 数据变化检测功能	33
4.10 手动模式与程序调试要点	34
第 5 章 人机界面系统组态设计	35
5.1 人机界面硬件与运行系统	35
5.2 根画面与主要控件	36
5.2.1 画面分辨率、样式与布局	36
5.2.2 5.2.2 I/O 域、文本域与变量绑定	36
5.3 报警、诊断与用户管理	36
5.4 可读性、多语言与远程维护边界	37
第 6 章 系统调试、实验与综合分析	38
6.1 系统调试与故障排查	38
6.1.1 分步调试流程	38
6.1.2 典型故障与排查思路	38
6.1.3 分阶段验证记录表字段设计	38
6.2 安全性、能效与文档交付	38
6.2.1 风险评估与软硬件联锁分层	38
6.2.2 文档交付清单	39

6.3 运维、培训与季节性运行	39
6.3.1 日常点检与定期保养	39
6.3.2 软件备份、备件与人员培训	39
6.4 实验测试方案与数据处理	39
6.4.1 实验目的、设备与工况	39
6.4.2 顺序与模拟量、PID、故障注入实验	40
6.4.3 结果表达与测量不确定度	40
6.4.4 实验安全与伦理要求	41
6.5 环保、节能与经济性	41
6.5.1 环保与洁净供气	41
6.5.2 节能机理归纳	41
6.5.3 经济性粗算与生命周期	41
6.6 标准符合性、系统扩展与讨论要点	42
6.6.1 电气安全与压力设备相关说明	42
6.6.2 工业以太网、OPC UA 与预测性维护	42
第 7 章 结论与展望	43
致谢	44
参考文献	45

第 1 章 绪论

1.1 研究背景与问题提出

1.1.1 无油空压机的工程地位与应用场景

压缩空气被称为工业现场的“第四能源”，在气动执行、吹扫、仪表用气等场合不可或缺。医药灭菌、洁净车间、食品加工、电子贴片、分析仪器供气等对含油率敏感的场景，普遍优先选用无油空压机，以降低油雾与油蒸气对工艺与产品的风险。无油机型在压缩腔内不引入润滑油或仅微量参与，其排气品质更易满足高等级要求，但对热管理、冷却与控制的依赖更强。从系统角度看，无油机并非“无维护”，而是将风险从油污染转向热与机械约束：排气温度、冷却风量、轴承温升与容调阀响应共同决定能否长期稳定运行，因此控制系统的角色由“简单启停”上升为“工艺与安全一体化管理”。此外，用户对供气压力稳定性的期望往往与管网容积、用气波动和季节环境温度耦合，单一机械调节难以兼顾，数字化控制成为必然选择。

1.1.2 传统继电器控制的局限与可编程控制器技术路线

工程现场若长期依赖大量中间继电器、时间继电器与分散仪表，则柜内线束复杂、故障定位困难，工艺边界变化时常需改线。可编程逻辑控制器以软件化逻辑替代硬接线，配合模拟量模块、人机界面与事件记录，可实现顺序过程可视化、参数在线调整与版本管理，已成为压缩机控制的主流路线。本课题选用西门子 S7-1214C 型 PLC 作为核心控制器，与专用单片机板卡相比，PLC 在标准化、编程环境、在线诊断与备件体系方面更具优势；与纯上位机软 PLC 相比，PLC 在抗干扰与实时性方面更适于现场电磁环境。本设计在 PLC 侧完成顺序控制与联锁，在连续量调节侧通过功能块实现 PID 并与变频器频率给定衔接，形成离散事件与连续控制相统一的分层结构。

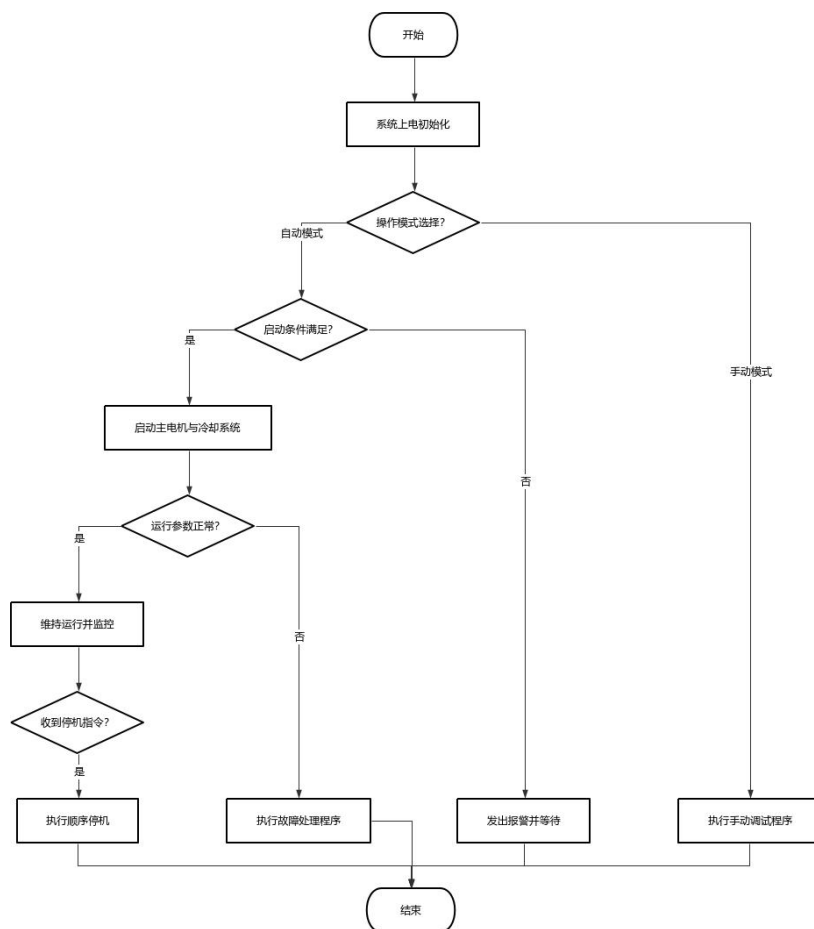


图 1-1 无油空压机技术流程图

1.2 研究意义

1.2.1 对设备安全与工艺稳定性的意义

将控制统一到 PLC 后，“启动—运行—加载/卸荷—停机—故障处理”可拆解为可验证的步骤与内部状态，降低带载误启停、冷却不足等风险；联锁与延时以定时器与比较指令实现，便于在线监视与复现。

1.2.2 对运维成本与参数可迭代性的意义

压力与温度阈值、PID 参数、各段延时以变量管理，可按季节、负载或管网改造迭代，而无需频繁改动主电路硬件；备份与注释完善的程序有利于全生命周期维护。对设备管理部门而言，可复现的故障代码与步骤号，例如启动步骤寄存器与停机步骤寄存器，有助于缩短平均修复时间；对能源管理而言，压力设定与 PID 参数的可追溯变更有助于开展节能审计与对标。对教学与工程训练而言，完整的资料链有助于建立强电、弱电、软件与界面一体化的系统认识，克服单一环

节割裂的认知局限。

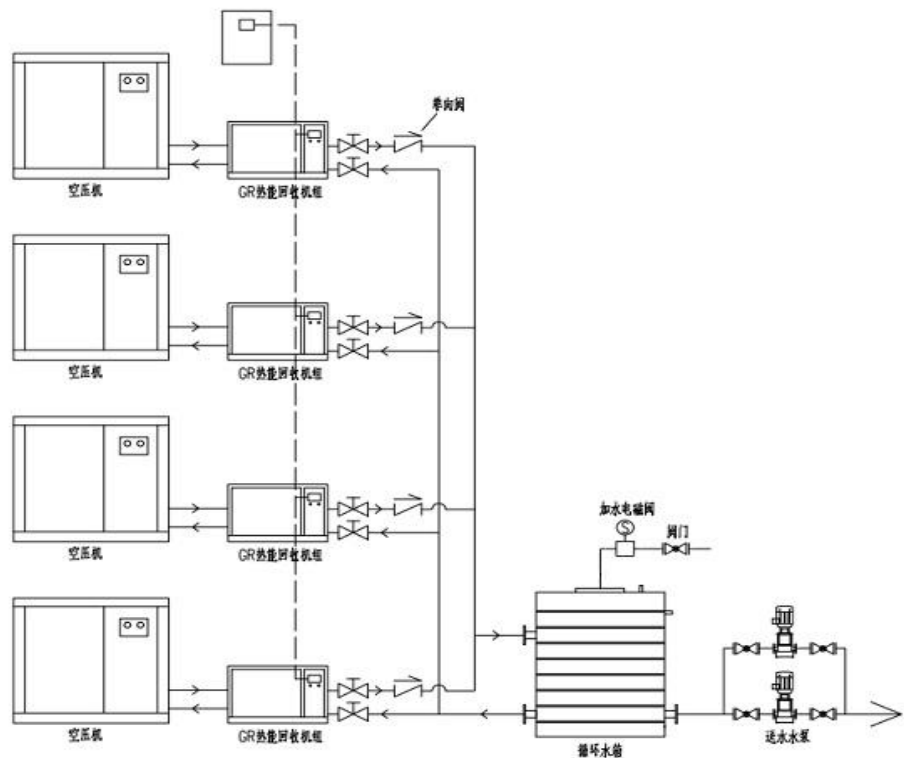


图 1-2 系统总体控制流程图

1.3 国内外研究与应用现状

国外高端整机厂商常将驱动与控制深度集成；国内工程实践中通用 PLC 应用广泛，成本与可维护性优势较为突出。学术界对节能、变频与联控的研究较多，而单机顺序逻辑与联锁细节的公开案例多来自工程项目。本文以一套可工程实施的 S7-1200 实例为主线，贯通电气图纸、控制程序与人机界面。在制造业数字化背景下，空压机站数据上云、边缘计算与预测性维护受到关注，其实施仍以现场侧可靠的顺序联锁与模拟量品质为前提；本文所论述的主电路、I/O 与模拟量标定及 OB1 主程序，构成上层应用的数据基础。若底层联锁与量程设置存在缺陷，则上层系统可能放大错误信息，工程实践中对此须予以充分重视。



图 1-3 空压机远程监控控制系统

1.4 论文章节结构

第1章绪论；第2章控制系统需求分析与方案论证；第3章电气主电路与 PLC 控制系统硬件设计；第4章 PLC 控制程序设计；第5章人机界面系统组态设计；第6章系统调试、实验与综合分析；第7章结论与展望。七章结构兼顾论述篇幅与工程可读性：硬件与软件分章有利于评阅定位；调试与实验合章有利于集中呈现验证过程；末章归纳全文结论并展望未来工作。

第 2 章 控制系统需求分析与方案论证

本章在无油压缩工艺与供气回路约束下，依次阐述控制功能需求、控制策略比较及感知—决策—执行分层关系，并于后文集中给出压力、温度与开关量传感器的现场选型及其与 PLC 模拟量模块的匹配要点，为第 3 章电气主电路与 PLC 硬件设计及第 4 章程序标定提供统一输入。论述顺序为：工艺与回路约束，需求分解，控制策略，分层模型与评价指标，热力过程、后处理与仪表接口的补充讨论，以及现场传感器与仪表选型归纳。

2.1 无油压缩工艺特点与运行约束

2.1.1 无油结构机理简述

无油机常采用干式密封、涂层转子、无油涡旋等路径，使工作腔润滑油参与量极低。优点是排气含油可控；代价是摩擦与压缩热管理更依赖材料、冷却器与冷却风量。螺杆、活塞与涡旋等不同结构型式在流量脉动、噪声与维护周期上差异明显，控制策略也需适配：例如活塞机压力脉动更大，压力测点阻尼与 PID 滤波需更谨慎；涡旋机在某些工况下对温度更敏感。本文不对机型作系统对比，但须强调无油并不等于无热工风险，热相关测点与联锁在程序中占据重要地位。排气压力与排气温度的测量链路在量程、阻尼与安装位置上须与机型及脉动特性匹配，具体选型原则见 2.8 节。

2.1.2 温度、冷却与联锁的耦合关系

冷却风量不足会导致排气温度升高并触发超温联锁。控制策略需保证主电机与冷却风机时序合理，停机顺序宜先卸荷、再断主电机、再停风机，以照顾热惯性。从控制理论角度看，温度对象往往具有更大惯性，压力对象相对更快；二者通过工况相互影响：压力调节改变转速与负荷，进而影响温升。因此仅调压力 PID 而不关注温度保护，可能在某些边界区触发超温停机。本文所述程序将温度越限作为故障类输入，与压力保护并列，体现了在多变量约束下实现安全运行的设计思想。温度元件的响应滞后与套管导热特性将直接影响超温判据的可达性与误报率，与 2.8.2 节选型及安装要求一并考虑。



图 2-1 涡旋式空压机

2.2 供气回路与加载/卸荷概念

“加载”指使机组对管网充气做功的阀门状态组合；“卸荷”指低功率或空载循环。本设计采用进气/加载电磁阀与卸荷电磁阀协同，配合压力闭环。高压极限压力开关提供硬件级冗余；低压用于识别泄漏或传感器异常；两类开关的设定值、回差及与模拟量压力通道的分工见 2.8.3 节。从气动力学角度看，管网相当于一个弹性容积，压力变化率与瞬时流量平衡有关；加载与卸荷的切换会在管网中形成压力波动，切换过于频繁将影响末端压力品质并加剧阀件磨损。因此除将压力控制在设定区间外，尚须对切换频率与延时加以约束，该要求与第 4 章所述步骤链及滞环设计相一致。压力闭环所用变送器量程与测点位置应能覆盖上述波动区间，避免量程过窄导致饱和或分辨率不足。



图 2-2 储气罐安装图

2.3 控制功能需求分解

2.3.1 模式管理与启停管理

自动/手动切换；启动、停止、急停、复位；急停后系统进入安全态的范围以现场安全评估为准。模式管理的核心是互锁：自动模式下应禁止手动点动误触发，除非设计明确允许；手动模式常用于检修后首次点动验证，需配合挂牌上锁与双人确认等管理措施。启停管理需区分“正常停止”“紧急停止”与“故障停机”：正常停止可走顺序停机链；急停强调时间最短地进入安全态；故障停机需记录故障类别，便于复位前的条件检查。

2.3.2 顺序控制与模拟量采集

自动启动分步完成卸荷预置、主电机合闸、反馈确认、冷却风机投入等；停机带延时链。排气压力、温度经西门子 SM 1234 模拟量扩展模块采集并标定为工程单位；电流或电压量程、热电阻接线方式与滤波配置须与所选变送器及温度元件一致，硬件与端子侧要点见 2.8.4 节，标定程序见第 4 章。顺序控制的本质是时间约束下的状态迁移：每一步的进入条件与退出条件必须显式定义，避免隐式依赖“扫描顺序”。模拟量采集除标定外，还应考虑传感器故障模式：如断线、短路、超量程，在工程上可扩展为诊断功能，相关深化留待后续工作。

2.3.3 闭环调节与故障管理

以排气压力为反馈、变频器频率为输出；变压/恒压由标志位区分。故障含超压、超温、低压、过载、启动反馈超时等，声光与停机步骤联动。超压与低压判据既依赖模拟量通道的分辨率与量程裕度，也依赖压力开关的动作边界，二者

在 2.8 节选型中应避免逻辑重叠或死区过大。闭环调节应设置输出限幅与速率限制，限幅与速率限制可在驱动器或 PLC 侧实现，防止压力误差突变导致频率跳变。故障管理应区分“可自恢复”与“需人工复位”：如瞬时超压经消抖后恢复，与持续性超温停机的处理策略不同。

2.3.4 人机交互需求

参数设定、过程监视、报警与用户管理，相关能力在 HMI 侧可按项目启用。人机交互的设计原则是：常用操作路径短、关键参数变更可审计、报警信息可读且可确认。对无油机而言，温度与压力往往并列显示，便于操作员形成“热力工况”整体判断，而非孤立看单一数值。

2.4 控制策略比较与选型

开停、节流、变频及泄放组合各有适用边界。本资料体现“变频+容调”混合：PID 输出频率，加载/卸荷阀协同；最低转速与最高排气温度须按制造商包络校核。纯开停策略在轻载时可能频繁启停，损害电气与机械寿命；纯节流在部分负荷下存在较大节流损失；变频调速在宽范围内可维持较高效率，但低速区可能面临冷却与润滑边界。该混合策略对压力测点的脉动抑制与温度测点的响应速度提出了与工频开停不同的要求，压力变送器阻尼与温度套管配置宜在 2.8 节与制造商包络一并校核。工程选型应结合用气曲线、电费结构与初投资，本文侧重控制实现，不展开全生命周期经济性建模。

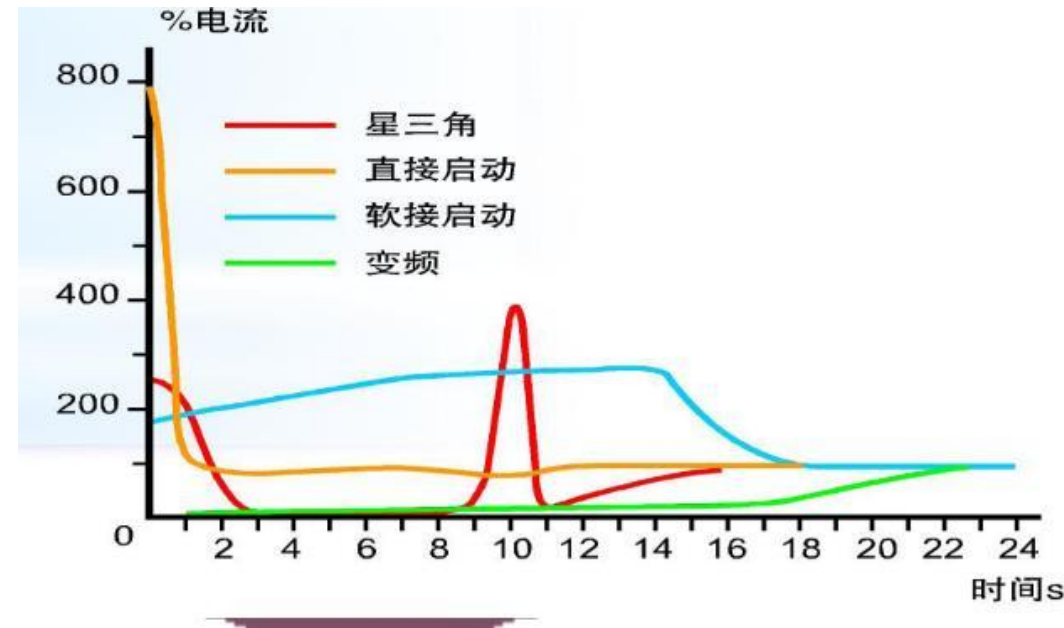


图 2-3 空压机启动曲线

2.5 设计边界、假设与评价指标

2.5.1 设计边界与假设

程序默认值来自 TIA 导出资料；压力单位、变送器量程、变频器接口形式、急停类别须按铭牌与风险评估复核。传感器量程、精度等级与报警阈值须在 2.8 节仪表数据表、程序常数与 HMI 显示单位之间保持一致；若现场更换变送器或探头，应同步修订标定与文档。

2.5.2 评价指标建议

稳态压力波动、加载/卸荷切换频率、排气温度分位数、故障误报率、急停恢复时间、单位能耗等；其中压力与温度类指标与变送器重复性、温漂及开关量回差直接相关，验收时宜记录所用仪表编号与校准有效期。建议将指标分为“验收指标”与“运维指标”：验收时关注功能与性能是否达标；运维时关注长期漂移与误报率。在学位论文撰写中，若具备实验条件，可给出改造前后对比曲线；若不具备，应保留指标定义与测量方法，数据处标注待实测并说明原因，以保证学术诚信。

2.6 热力过程、后处理与仪表接口的补充讨论

2.6.1 压缩热与报警阈值的工程含义

无油压缩过程中温升与压缩功、传热及冷却风量相关。控制程序中的超温报警值按资料初值约为 95 °C，在工程上必须与制造商给出的最高允许排气温度、轴承与密封工作温度上限一致，现场应以铭牌与说明书复核。

2.6.2 后处理装置对控制回路的影响

无油降低了油分风险，但冷冻干燥机、吸附干燥机与精密过滤器仍会引入压损与附加容积效应。若压力测点位于机组出口而后处理压损较大，用户端实际压力可能低于测点压力，可通过调整设定值、远端补偿或改造管网解决；

2.6.3 振动、噪声与信号品质

机组振动可能导致变送器接头松动或模拟线缆磨损，表现为阶跃或漂移。安装阶段应防松、应力释放并在调试记录基线噪声，PID 若出现周期性振荡，需同步排查机械共振、阀门粘滞与采样阻尼，而非仅调软件增益。

2.6.4 供气波动与生产节拍

部分工厂用气与生产节拍强相关，表现为周期性大流量冲击。若 PID 带宽过窄，频率与阀件可能频繁动作。可通过储气罐、管网优化或前馈/分段 PID 改善；本文程序以通用压力闭环为主，前馈属于扩展课题。

2.6.5 仪表专业接口清单

宜建立仪表数据表、PLC 硬件配置与 HMI 显示格式之间的联动关系，字段至少包括位号、量程、精度、响应时间、安装坐标、导压或测温方案、校准周期与证书编号，并与 8.5 节 2 选型汇总表同源维护，避免图纸、程序与界面三处不一致。若现场存在大功率变频器、焊机等强电磁设备，尚需在布置上拉开距离并在 PLC 侧评估软件滤波或硬件隔离器；该要求与 2.8.4 节布线及接地论述衔接。

2.7 现场传感器与仪表选型

2.7.1 排气压力变送器

排气压力作为控制反馈与联锁判据，宜选用带标准化模拟量输出的压力变送器，量程下限应覆盖负压或大气压侧工况，上限应覆盖额定工作压力并留有安全裕度，以便在过压或传感器异常时仍能给出单调信号。精度等级与长期漂移指标需与压力设定公差及报警阈值相匹配，否则 PID 输出与报警边界将难以同时标定。工程上常采用两线制四至二十毫安输出，与 PLC 模拟量输入电压或电流通道配合，必要时在端子侧串联阻抗匹配。测点宜取在脉动相对平缓的管道位置，并配置阻尼器或阻尼针阀以抑制螺杆或活塞机压力脉动带来的测量噪声。静压与温漂对绝压变送器与表压变送器选型有区别，本课题以表压测量为主时，须按介质与海拔复核零点。选型完成后，以制造商提供的量程与接线方式为准，在软件侧完成标定换算。

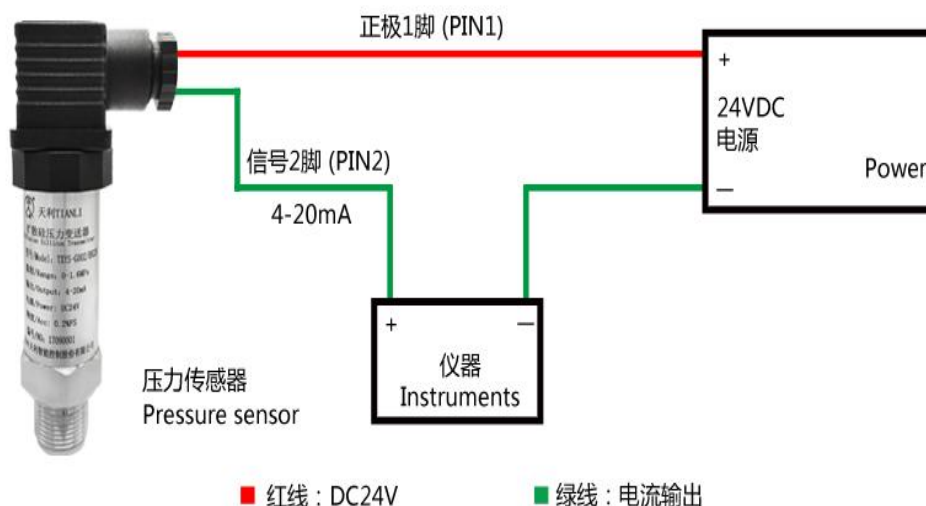


图 2-4 压力变送器 4-20mA 两线制

2.7.2 排气温度检测元件

排气温度用于超温保护与热力工况监视，常采用铂电阻 PT100 或热电偶，具体取决于量程、响应速度与接线成本。安装位置应位于能代表排气热力状态的位置，并采用保护套管或铠装结构，避免高速气流冲击与振动引起断裂。套管与工艺管线之间需保证传热路径，并避免测温点滞后过大导致控制与保护不同步。与 PLC 的 SM 1234 等热电阻模块配合时，须确认线缆长度、三导线或四导线补偿方式与模块类型一致，否则将引入零点偏差。温度量程与报警阈值须与制造商规定的最高允许排气温度及轴承温度上限一致。

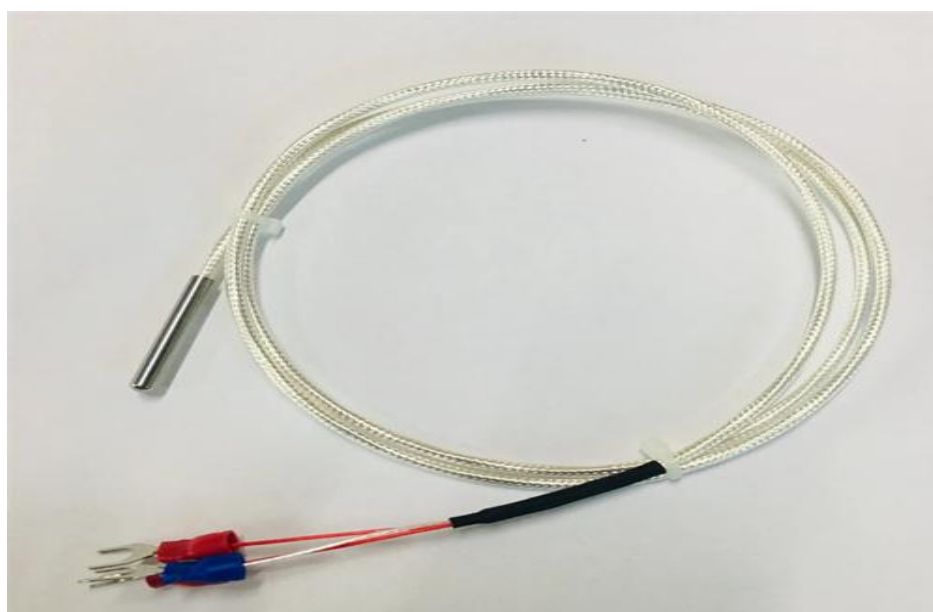


图 2-5 PT100 铠装探头

2.7.3 压力开关与开关量传感器

除模拟量外，本设计采用高压极限压力开关、低压开关等作为硬开关量输入，用于硬件冗余或快速故障判定。选型需关注设定量程、回差、接点形式与触点容量，并与 PLC 数字量输入电压等级、电流类型匹配；交流型开关量需与直流型 PLC 输入模块区分。机械式压力开关结构简单、便于现场标定，电子式压力开关可调回差与诊断能力更强。极限压力开关的动作值应低于安全阀整定并高于正常调节上限，避免与 PID 调节区间重叠。若需接近开关、行程开关等辅机位置信号，其防护等级与电缆屏蔽方式应与柜内环境一致。



图 2-6 压力继电器空压机

2.7.4 信号与 PLC 模拟量模块匹配要点

本课题采用西门子 SM 1234 模拟量扩展模块采集压力与温度，通道类型、电压量程、电阻与电流范围需与变送器输出一致。四至二十毫安电流输入回路宜共用电源参考或采用隔离器，避免多路接地环路引起共模干扰。模拟线缆与动力电缆分层敷设，屏蔽层单端接地，长距离传输时评估是否配置信号隔离器。若输入为电压型，需核对变送器负载与分压。采样周期与滤波时间常数需在软件中配置，与 PID 与控制周期协调，避免过短采样放大噪声、过长采样滞后相位。

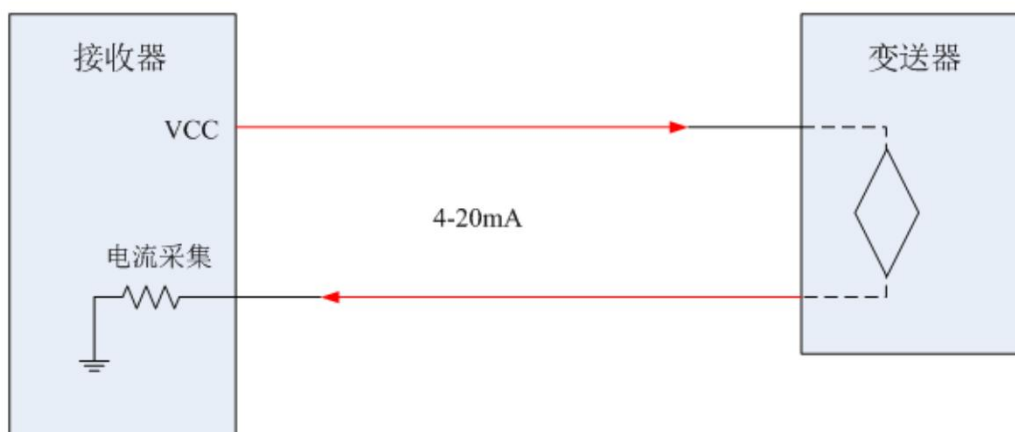


图 2-7 4-20mA 电流环、两线制接线

2.7.5 选型汇总与安装要求

将上述传感器选型结果以表格形式汇总至仪表数据表，列明位号、量程、精度、响应时间、安装高度、制造商与出厂编号，便于与第 3 章 I/O 配置及第 4 章标定程序对照。安装阶段应完成首次零点和量程标定，并在调试记录中注明环境与介质状态。与 HMI 的显示格式与单位统一，避免工程单位与软件标定值不一致的叠加误差；

第 3 章 电气主电路与 PLC 控制系统硬件设计

本章依据第 2 章所确定的执行机构、测点与传感器输出制式，从强电侧阐述空压机主电机与冷却风机的主回路、保护与接触器驱动关系，继而给出控制柜内 PLC 本体与 SM 1234 扩展、数字量与模拟量 I/O 与现场器件的对应，并说明机柜布线、接地、以太网与直流供电的工程要点。

3.1 电气主电路设计

3.1.1 主回路组成

主电路为两台三相电机供电：空压机主电机与冷却风机电机。与卸荷电磁阀、声光及模式指示等执行路径共同构成“强电能量流—弱电逻辑流”闭环。从功能划分看，空压机主电机承担压缩做功，冷却风机电机承担换热器与机组散热，两者在热力学上耦合：主电机功率与排气温度上升相关，风机不足则温度升高。控制程序通过步骤链保证风机投入时机与停机顺序，是对主电路启停次序的软件化约束。主电路图纸阅读时应同时标注电机铭牌：额定电压、电流、功率因数、接法与保护整定值，为后续第 6 章实验与保护校验提供依据。

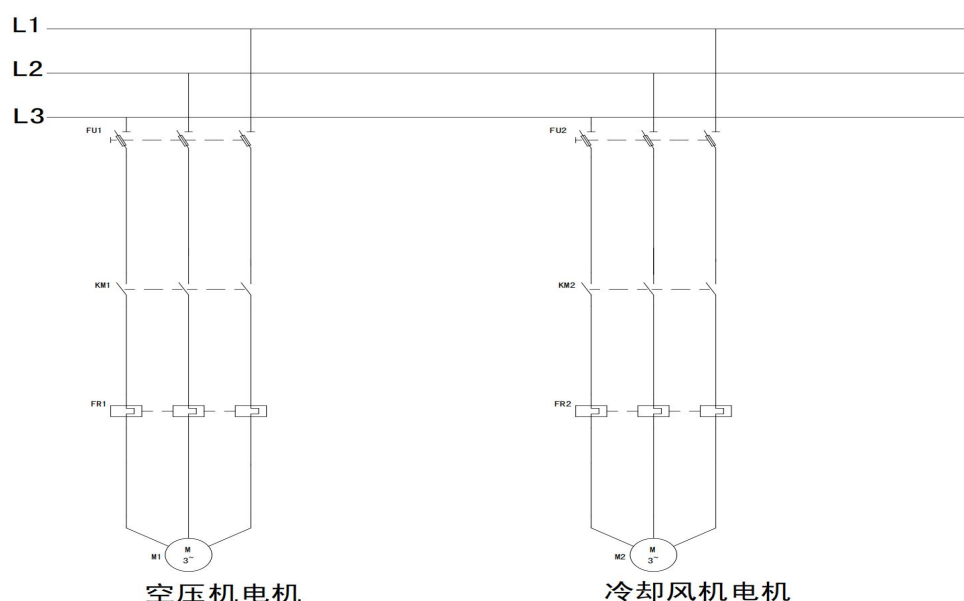


图 3-1 主电路原理图

3.1.2 接触器与热继电器的配合原则

按额定电流、AC-3 类别、线圈电压选型；热继电器按铭牌电流整定并考虑环境温度；短路器件分断能力须满足安装点预期短路电流。对于变频器供电的电机回路，除工频回路外，尚需注意谐波电流对热继电器的影响：部分场合采用电动机保护断路器或电子式保护以获得更稳定的保护曲线。接触器寿命分为机械寿命与电寿命，在频繁启停场合应选用合适容量并留裕量。辅助触点用于 PLC 反馈时，应选用可靠触点并避免同一辅助触点既作安全链又作一般反馈混用，除非经过安全评估。

3.1.3 控制电源与 PLC 输出的接口

Q 点驱动接触器与电磁阀时注意浪涌与功耗；必要时经中间继电器扩容；指示灯与阀岛宜分区供电。直流 24 V 回路的总电流容量应留 20%以上裕量，避免多台阀同时吸合导致压降过大引起 PLC 复位或误动作。对感性负载可在线圈侧并联浪涌抑制器件，例如 RC、压敏或二极管，具体依线圈类型选择。若 PLC 输出与现场距离较远，宜采用中间继电器隔离，降低长线感应电压对模块的冲击风险。

3.2 安装工艺、接地与电气安全

3.2.1 图纸阅读、端子与线号

自上而下追踪电源—保护—执行—负载；与 I/O 表核对每个线圈对应的 Q 点；形成端子表与线号表。施工阶段建议执行“先原理后接线”的双签制度：原理图修改必须同步到端子表，避免口头变更造成后期无法对图。线号编码宜包含柜号、页码与序号规则，便于故障时快速定位。对于改造项目的增量回路，应用不同线号段区分新旧，减少混线概率。

3.2.2 电缆、接地与等电位

动力与信号分层敷设；PLC 地、机柜地与 PE 拓扑清晰；变频器场合注意高频漏电流与模拟屏蔽单端接地。模拟信号电缆应远离变频器动力电缆，交叉时宜垂直交叉；长距离模拟传输可考虑隔离器或改用通信。PE 导体连续性测试应在送电前完成并记录。雷电活动频繁地区，尚需在电源入口考虑浪涌保护器与等电位连接策略，具体等级按建筑物防雷分区设计。

3.2.3 柜内热管理与备件互换性

接触器与变频器为热源，需通风或空调裕量；同型备件便于互换；热继整定钮宜封签。机柜温升过高会导致 PLC 与模块降容或误码，夏季现场常见问题即源于此。备件策略上，建议至少保存一套关键接触器主触点与线圈、一套常用电磁阀线圈，以及经校准的备用变送器，在预算允许时应纳入备件，以缩短平均修复时间。

3.3 PLC 与扩展模块选型及 I/O 配置

3.3.1 CPU 与 SM 1234 模拟量扩展模块

本课题选用西门子 S7-1214C 型 CPU，其集成的数字量输入与输出规模可满足空压机顺序控制、手自动切换、阀件与接触器驱动及状态反馈等对 I/O 点数的常规需求；扩展模块采用 SM 1234 模拟量输入/输出组合模块，用于采集排气压力变送器、排气温度检测元件输出的标准电流或电压信号及热电阻信号，并在程序中经 NORM_X、SCALE_X 换算为 MD110、MD56 等实数工程值。选型与槽位布置须满足：模拟通道类型、电压或电流档位、热电阻类型及接线方式与硬件配置字、变送器铭牌及探头补偿方式一致，否则将出现通道饱和、线性错误或温度跳变。CPU 与扩展模块的电源预算、环境温度范围及安装方向应符合产品手册，机柜内温升较高时应按降容曲线复核。

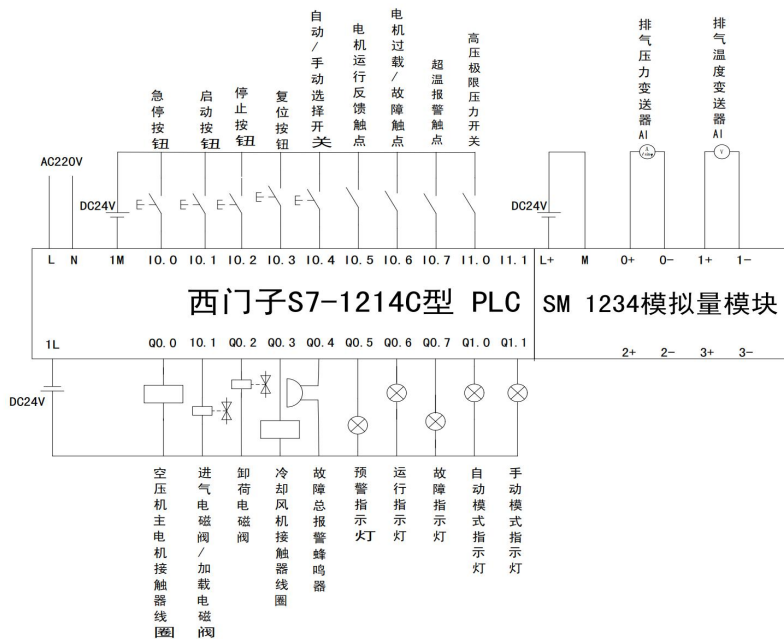


图 3-2 PLC 系统接线总览

3.3.2 数字量输入输出与现场器件

数字量输入侧连接急停、启动与停止、复位、手自动切换、接触器与辅机运行反馈、电动机过载、超温、高压与低压极限、门开关等；数字量输出侧驱动主电机与冷却风机接触器线圈、进气加载与卸荷电磁阀、声光报警及模式指示灯等。上述信号分工与控制功能需求及压力开关、极限开关选型相呼应，符号名、绝对地址与端子号以 PLC 原理图及端子表为唯一依据，本设计将其归纳为表 3-1，

序 号	输入地 址	输入功能	输出地 址	输出功能
1	I0.0	急停按钮	Q0.0	空压机主电机接触器线圈
2	I0.1	启动按钮	Q0.1	进气 / 加载电磁阀线圈
3	I0.2	停止按钮	Q0.2	卸荷电磁阀线圈
4	I0.3	复位按钮	Q0.3	冷却风机接触器线圈
5	I0.4	自动 / 手动选择开关	Q0.4	故障总报警蜂鸣器
6	I0.5	主电机运行反馈触点	Q0.5	预警指示灯
7	I0.6	电机过载 / 故障触点	Q0.6	运行指示灯
8	I0.7	超温报警触点	Q0.7	故障指示灯
9	I1.0	高压极限压力开关	Q1.0	自动模式指示灯
10	I1.1	低压极限压力开关 / 门开关	Q1.1	手动模式指示灯

图 3-3 I/O 总表

3.3.3 模拟量通道与工程换算思路

程序中“模拟/实机”等标志位用于仿真与现场切换；换算后的工程值供 PID、越限比较、报警与 HMI 显示。SM 1234 输入的原始字在程序中经 NORM_X 归一化后再经 SCALE_X 映射到兆帕、摄氏度等物理单位，量程上下限须与 TIA 中通道量程、变送器量程及探头类型同时一致。若仅改软件常量而硬件跳线或变

送器量程未同步，表现为全量程比例错误，PID 无法收敛到工艺期望。温度通道须与热电阻接线及补偿方式一致；压力通道须区分表压与绝压及是否引入大气压修正。

3.4 机柜布置、通信与供电

3.4.1 布线工艺要点

导轨、端子、浪涌保护与接地铜排分区；模拟双绞屏蔽敷设。强电端子与弱电端子应物理隔离并加隔板；PLC 模块上方与下方保留散热空间。线槽填充率不宜过高，以利散热与后期增线。标签应覆盖柜门示意图、模块标签与线号，三位一体。

3.4.2 工业以太网与 OPC UA 配置

HMI 与 PLC 以太网互联；OPC UA 端口在 HMI 设置中出现，扩展时需账户、证书与最小权限。工业现场建议为 HMI 与 PLC 划分独立网段或 VLAN，限制无关设备接入；若需远程运维，应通过 VPN 或零信任网关而非端口直连公网。OPC UA 的安全策略，含签名、加密与用户令牌等，应在部署文档中写明，并定期轮换证书与密码策略。

3.4.3 供电容量、滤波与安全输入

统计同时吸合负载；配置输入滤波与急停/安全门策略时遵守安全模块手册。直流电源应选用足够短路电流能力与低纹波产品；必要时在 PLC 前级增加 UPS 以应对短时掉电。急停与安全门若接入普通 DI，仅能作为“控制意义上的联锁”，不能等同于符合功能安全等级的安全回路；若项目有 SIL 或 PL 要求，应选用对应安全模块并单独出图。

第 4 章 PLC 控制程序设计

4.1 软件架构与程序块划分

组织块 OB1 为 LAD 主程序，按网络分段；功能块 FB1 实现 PID 压力调节；功能 FC1 实现数据变化检测；整体体现顺序控制、连续调节与辅助监视相结合。OB1 在每个扫描周期由操作系统调用一次，故网络编排顺序在理论上影响同一周期内输出更新时刻；工程上应避免在同一周期内对同一输出既置位又复位而依赖扫描次序，宜合并为单一逻辑路径。FB1 带背景数据块，可保存积分项与历史偏差，适用于 PID；FC1 无背景数据块，适用于纯函数式计算。二者分工有利于程序结构清晰及单元测试与复用。

程序块

Main [OB1]

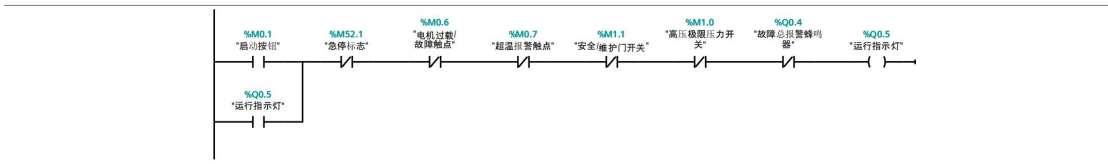
Main 属性							
常规							
名称	Main	编号	1	类型	OB	语言	LAD
编号	自动						
信息							
标题	"Main Program Sweep (Cycle)"	作者		注释		系列	
版本	0.1	用户自定义 ID					
名称		数据类型	默认值	注释			
▼ Input							
Initial_Call		Bool		Initial call of this OB			
Remanence		Bool		=True, if remanent data are available			
Temp							
Constant							

网络 1：系统初始化



图 4-1 组织块 OB1

网络 2：系统启停



网络 3：停止按钮 — 停机流程触发

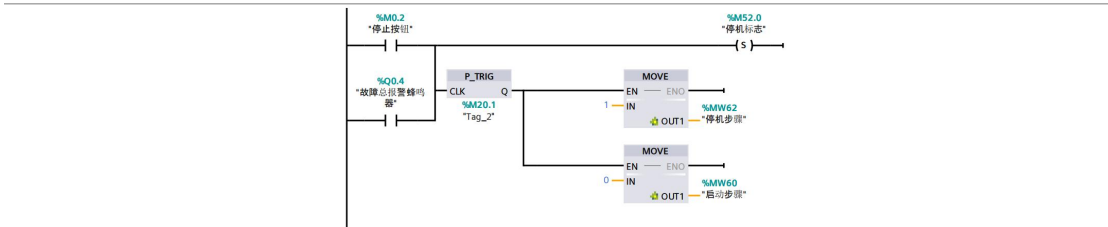


图 4-2 组织块 OB1

4.2 初始化与系统启停逻辑

4.2.1 首次扫描与输出默认安全态

FirstScan 网络复位关键输出与标志，使卸荷、主电机、风机等处于约定初始态。初始化策略应与机械与工艺默认态一致：例如卸荷阀在上电时应处于安全泄压或空载位置，避免带压误启动。若现场要求上电后禁止自动启动，尚须在程序中增设使能条件或钥匙开关；本文以所提供资料为限，不增设未经验证的功能。

4.2.2 允许运行条件与停止按钮处理

启动与急停、过载、超温、门开关、高压开关等构成允许链；停止用上升沿置停机标志并初始化 MW62。允许链的设计宜采用“全条件满足才允许输出”的正向逻辑，与“任一故障即断开”的负向逻辑在形式上可转换，但可读性不同。停止按钮采用上升沿可避免按住停止导致重复触发；停机步骤寄存器初始化确保停机序列从确定步号开始。

4.3 急停、故障复位与手自动切换

急停网络切断主电机与加载路径；复位网络成组清除故障位；手自动网络切换模式灯与步骤寄存器。急停复位前通常要求物理急停按钮旋起或拉出，程序侧仅响应复位按钮并不能替代机械状态确认。手自动切换时，宜将启动步骤恢复至安全起点或保持当前步骤，具体依工艺条件确定；

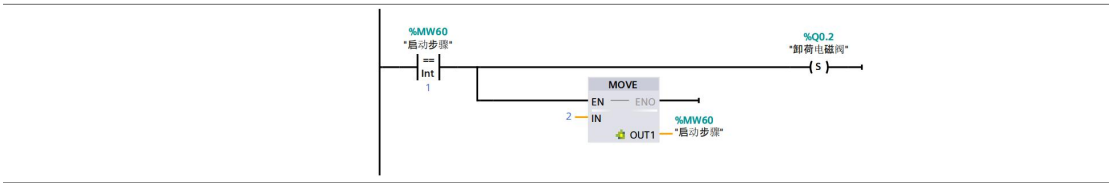
4.4 排气压力与排气温度的模拟量标定

网络 7、8 分别处理 IW64、IW66 等通道，输出 MD110、MD56 实数。标定公式中的量程上下限应与硬件配置及变送器铭牌一致；若现场采用不同量程，仅需改常量而非改网络结构。温度与压力通道可分别设置滤波：软件一阶滤波可与变送器阻尼叠加，过度滤波会降低响应速度，PID 整定时需一并考虑。

4.5 自动启动与停机步骤链

4.5.1 启动步骤寄存器 MW60 与定时确认

步骤号整数化推进：卸荷预置→主电机合闸→反馈 TON→风机投入→进入压力带；反馈超时置电机启动故障。该链路的工程意图是：先建立安全的容调与卸荷状态，再使主回路合闸，避免带载突启；运行反馈用于确认接触器主触点闭合与电机建立旋转，而非仅凭输出线圈置位；风机在主机之后投入符合“先冷却能力、再持续加载”的经验顺序，具体延时需结合风机功率与风道阻力实测。若反馈信号取自接触器辅助触点，应注意触点粘连风险：辅助触点不能替代电机保护器件的故障检测，只能作为顺序条件之一。



网络 10：自动启动 — 步骤 2

图 4-3 自动启动网络

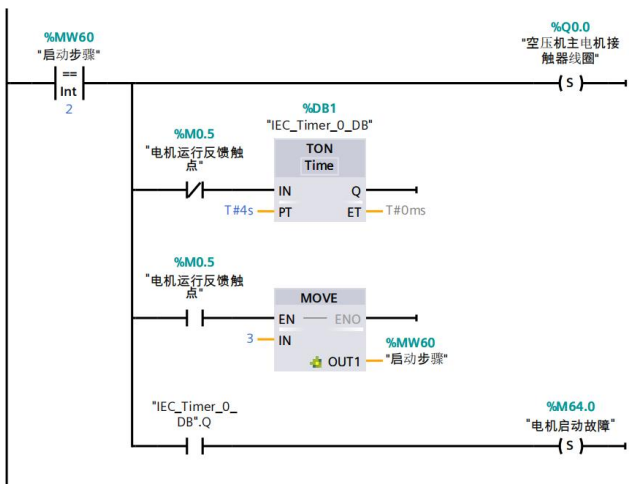
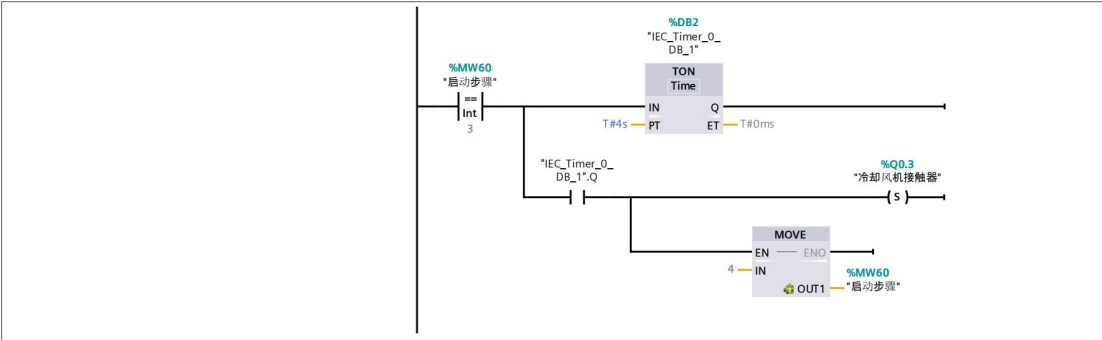


图 4-4 自动启动网络

网络 12：自动启动 — 步骤 3



网络 13：自动启动 — 步骤 4

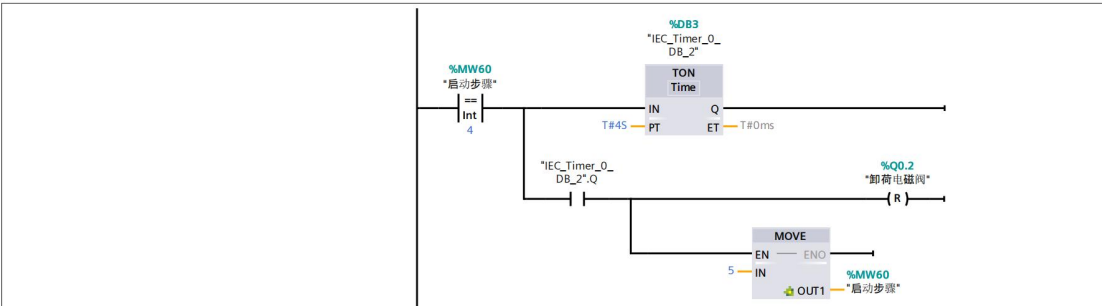
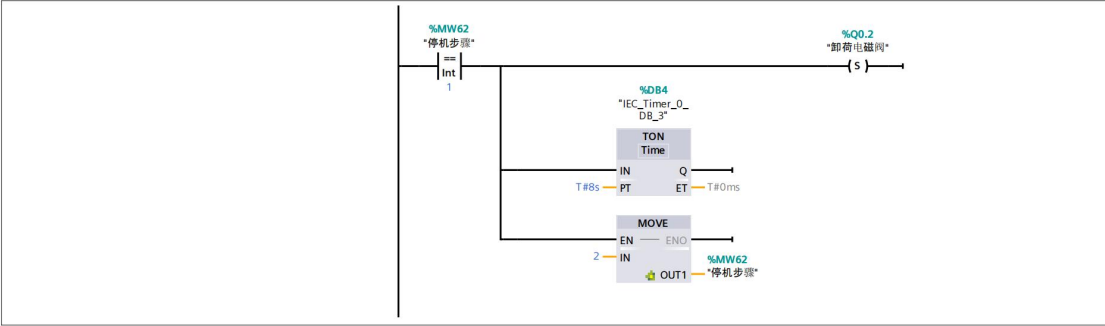


图 4-5 自动启动网络

4.5.2 停机步骤寄存器 MW62 与延序列

故障或停止进入停机链：卸荷保持→主电机断电延时→停风机；各步用 TON 与 MOVE 衔接。停机链强调“先卸压与卸荷，再断主动力，再停辅助冷却”，以降低机械冲击与热冲击；各段延时与机头热容量、管网容积有关，过短可能导致残余压力冲击止回元件，过长则延长恢复生产时间。调试时建议记录不同环境温度下的排气温度衰减曲线，作为延时整定的辅助判据。

网络 18：停机步骤 1 — 卸荷保持延时



网络 19：停机步骤 2 — 主机断电延时

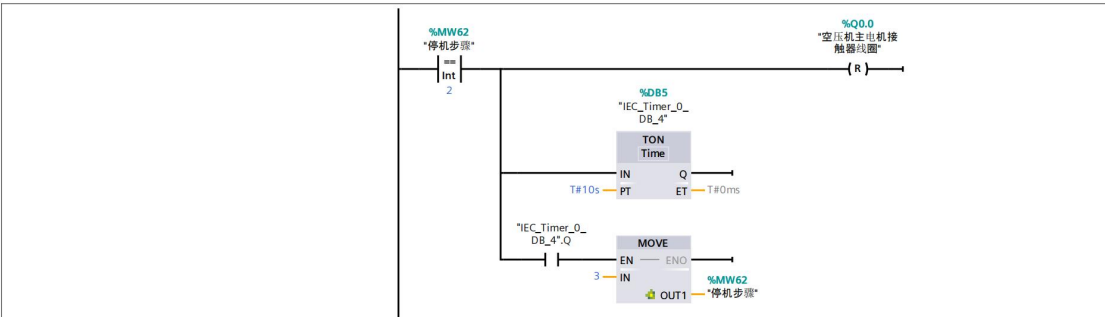


图 4-6 停机步骤网络

网络 20：停机步骤 3 — 冷却风机停止

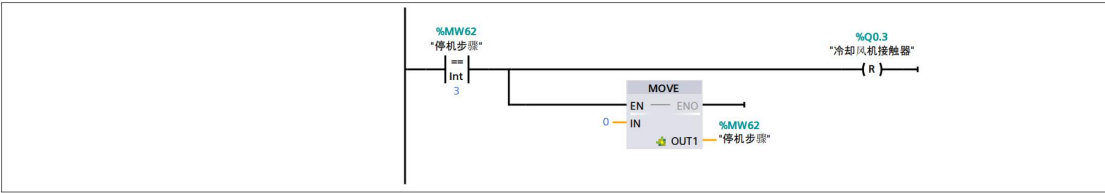


图 4-7 停机步骤网络

4.6 加载、卸荷与变压/恒压区控制

依据 M64.3 及压力与加载/卸载阈值比较，置加载或卸载状态，驱动 Q0.1/Q0.2；PID 未投入时默认频率约 25 Hz，具体以在线程序为准。变压与恒压在工程上对应不同的压力调节目标：前者可能跟踪用气变化，后者维持设定点。实现时通过标志位切换比较逻辑与 PID 投入条件。加载与卸载压力带之间应保留足够滞环，否则在临界区会出现阀件频繁切换与频率抖动。若现场振荡明显，应优先加宽滞环或增大 PID 死区，再考虑降低比例增益。

网络 18：停机步骤 1 — 卸荷保持延时

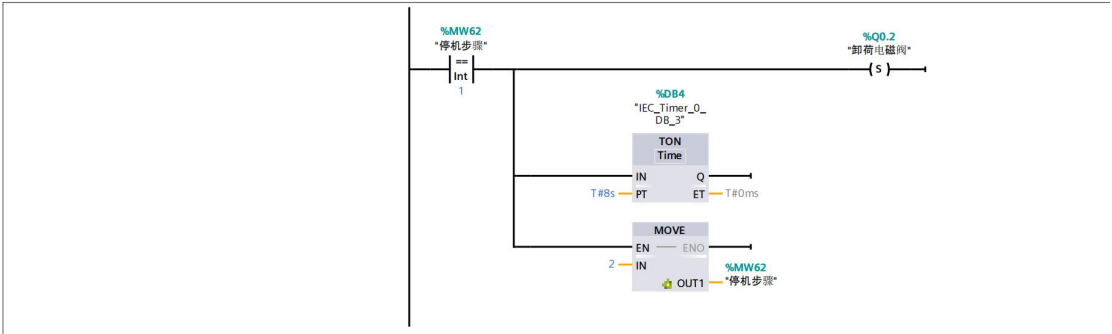


图 4-8 加载卸荷

4.7 故障检测、汇总与停机触发

超压、超温、低压经与 MD78/MD74/MD82 比较并延时确认；过载延时确认；网络 17 汇总触发 MW62。延时用于抑制测量噪声与短时工况冲击，但延时过长会削弱保护敏捷性，需在“误报率”与“响应速度”之间折中。故障汇总宜采用结构化优先级：危及设备的故障立即进入停机链；仅提示性故障可先报警不停机，是否允许须符合工艺要求并与所依据资料一致。

网络 15：故障检测 — 超压、超温、低压

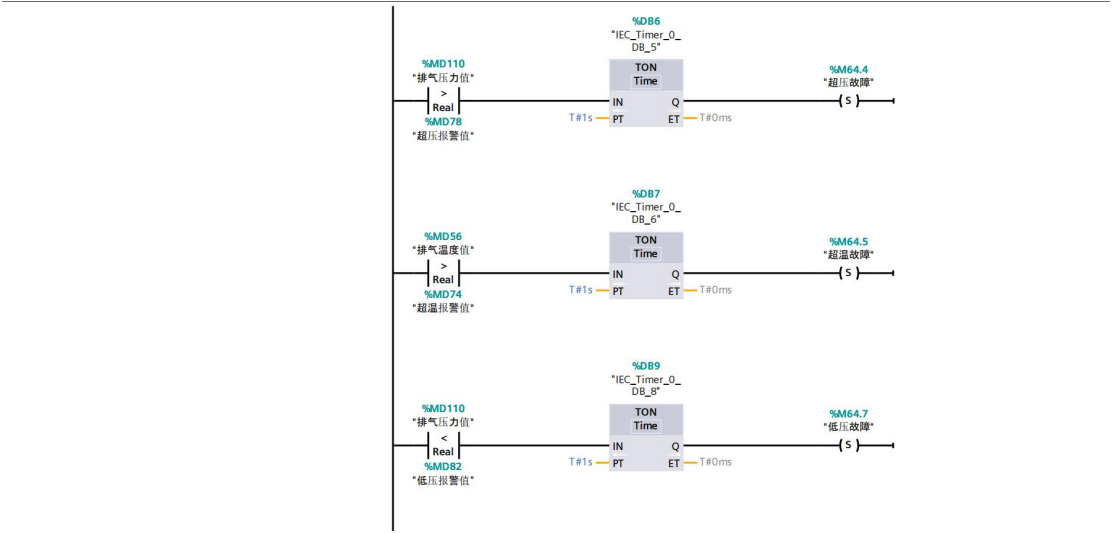
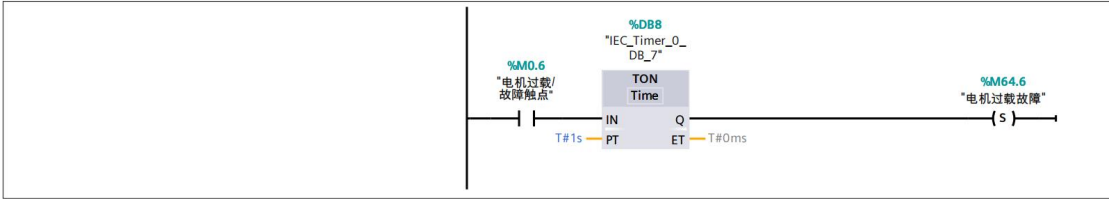


图 4-9 故障检测与汇总

网络 16：故障检测 — 电机过载



网络 17：故障汇总 — 进入停机步骤

图 4-10 故障检测与汇总

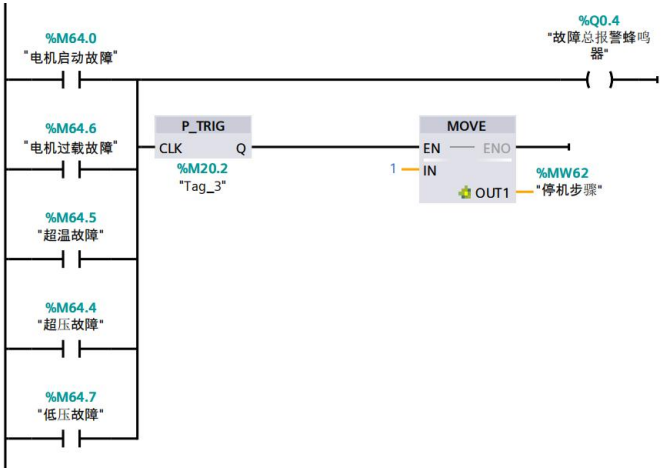


图 4-11 故障检测与汇总

4.8 参数初值装载与内部变量

网络 21 装载默认报警值、加载/目标/卸载压力、PID 参数等；现场以工艺为准复核。初值装载仅在首次扫描或指定条件下执行，避免运行中每周期覆盖操作人员在线修改；另有设计时除外。建议在 HMI 侧对关键参数设置上下限与权限，防止误输入导致跳闸。内部变量地址分配宜分区：故障位、模式位、步骤寄存器、模拟量各占一段，便于文档化与后期扩展。

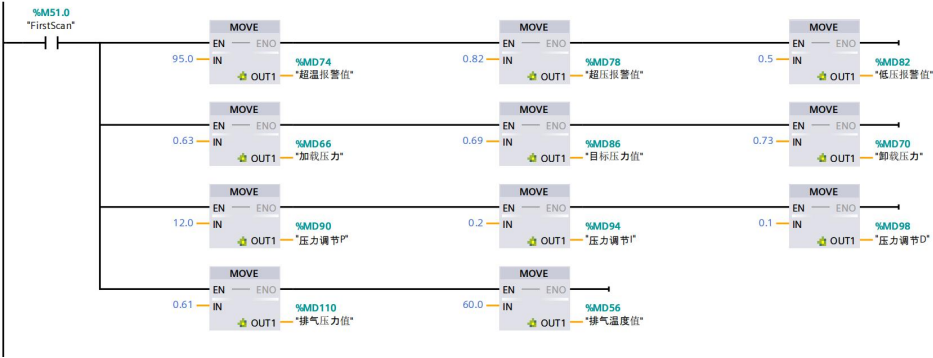


图 4-12 参数装载

4.9 PID 压力调节与数据变化检测

4.9.1 PID 压力调节功能块

输入实际压力、目标压力、投入开关；1 Hz 时钟离散化；输出 MD102 频率给定；输出限幅与关积分清零。离散 PID 对采样周期敏感：本设计采用 1 Hz 时钟作为积分步长，与 PLC 扫描周期解耦，可避免扫描抖动引起的积分不稳定。输出限幅应同时满足变频器最低/最高频率与机械允许转速；关积分清零防止 PID 在切出时残留积分导致下次投入冲击。若需前馈补偿，例如按用气流量构造前馈量，可在 FB 外环增加计算网络，本文不展开。

网络 2：PID 主运算（1 Hz 周期）

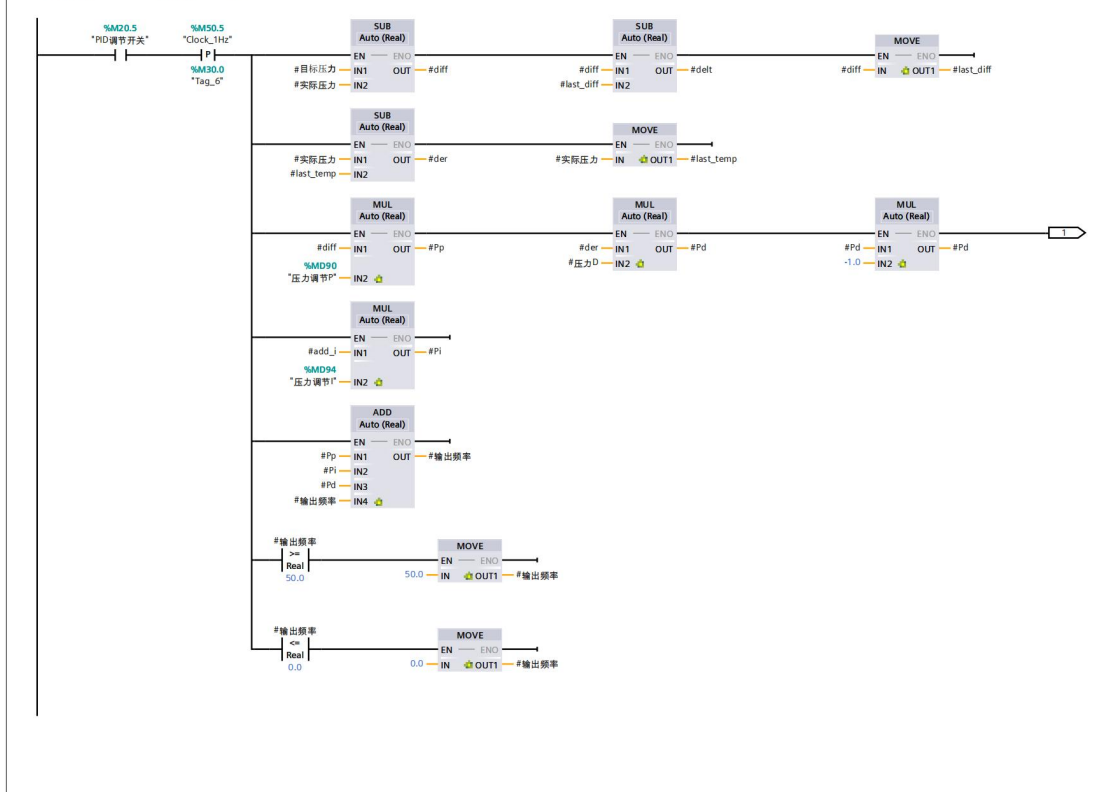
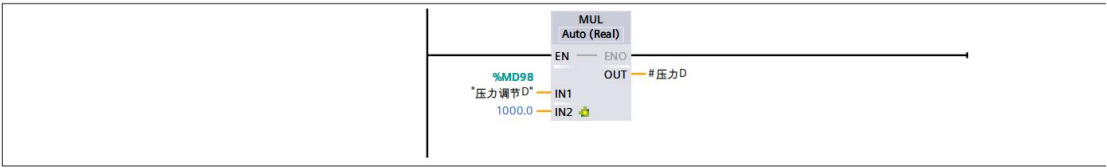


图 4-13 PID 压力调节

网络 3：微分项增益



网络 4：PID 关闭时积分清零



图 4-14 PID 压力调节

4.9.2 数据变化检测功能

监视频率与压力通道变化，辅助识别振荡或停滞。该功能在调节回路中起到辅助诊断作用：当频率指令变化而压力响应迟缓时，可能提示阀件卡滞或管网堵塞；当压力波动而频率不变时，可能提示传感器问题。具体判据以现代码为准，调试时建议记录触发时刻的趋势曲线。

网络 1：变频器—压力通道数据变化检测

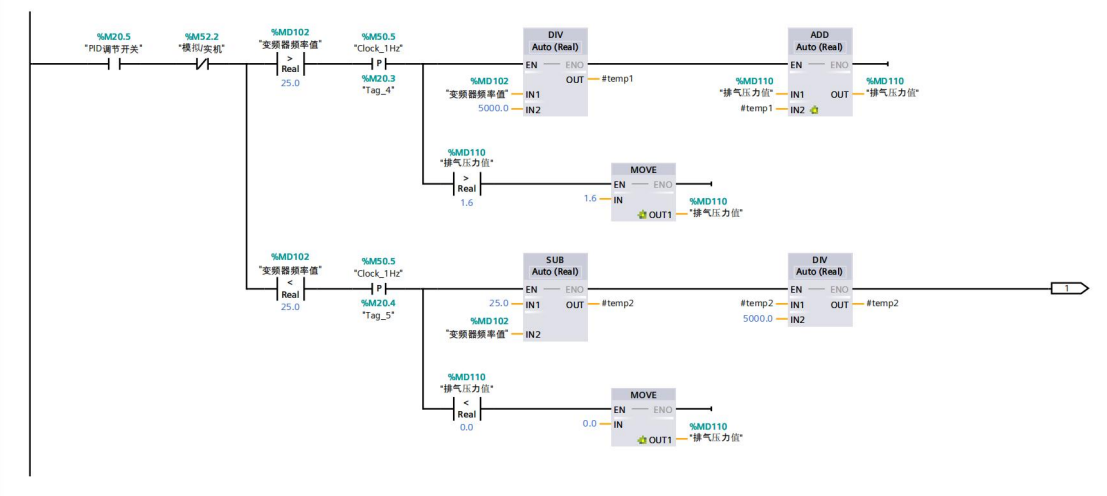


图 4-15 数据变化检测

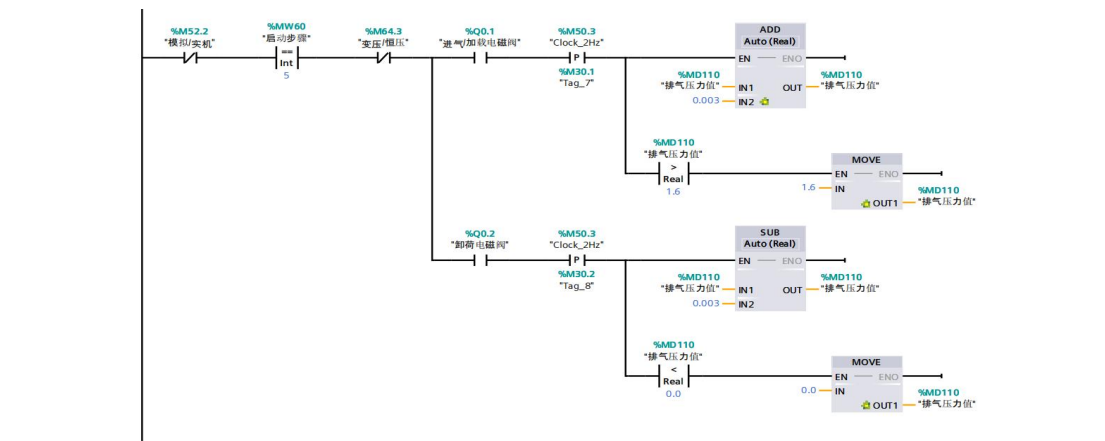
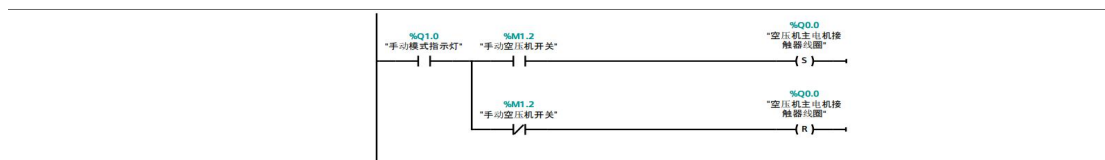


图 4-16 数据变化检测

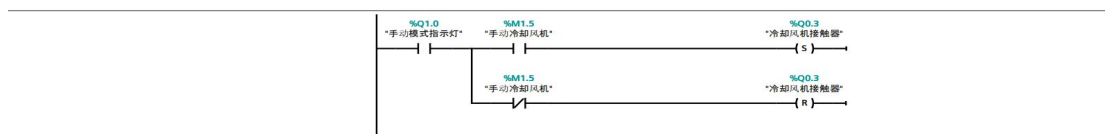
4.10 手动模式与程序调试要点

手动下点动主电机、风机、加载阀、卸荷阀，互锁于手动灯。在线监视 MW60/MW62、定时器 ET、MD102/MD110/MD56。手动调试应遵循“先阀后机、先风机后主电机”的经验顺序，具体以安全规程为准；任何手动合闸前确认机械无卡阻、无人员干涉。建议使用监控表与趋势图组合观察，避免只看瞬时值忽略过程。

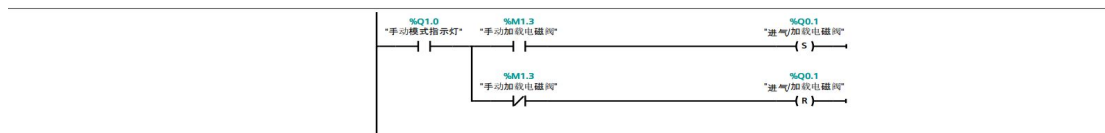
网络 23：手动模式 — 主电机



网络 24：手动模式 — 冷却风机



网络 25：手动模式 — 进气/加载电磁阀



网络 26：手动模式 — 卸荷电磁阀



图 4-17 手动控制网络

第 5 章 人机界面系统组态设计

5.1 人机界面硬件与运行系统

分辨率 1280×800，32 位色，根画面起始，中文运行语言，WinCC Dark 样式；与 PLC 以太网连接 HMI_连接_1。Comfort 系列面板具备较强图形性能与触摸体验，适合显示多路过程量与参数域。运行系统侧可启用屏幕键盘以支持无键盘环境下的数值输入；退出时是否释放按钮等选项将影响操作体验，应结合现场习惯在组态阶段确定。与 PLC 的周期通信负载及画面刷新率、变量数量相关：变量过多且刷新过快时，通信带宽占用上升，可能导致画面滞后，须在实时性与负载之间权衡。

常规					
起始画面	根画面	加载名称信息	已启用	默认模板	
项目的默认样式	已启用	HMI 设备的样式	WinCC Dark V 1.0.1	根据样式调整字体大小	已启用
画面分辨率	1280, 800	颜色深度	32 位	锁定任务切换	已禁用
项目 ID	0	记录语言	启动语言		
服务					
Sm@rtAccess 或服务：启动 Sm@rtServer	已禁用	作为 OPC 服务器运行	已禁用	Sm@rtAccess：SIMATIC HMI HTTP 服务器	已禁用
Sm@rtAccess：web 服务 (SOAP)	已禁用	Sm@rtService：HTML 页面	已禁用	SMTP 服务器名	
端口	25	SMTP 发送方的名称		SMTP 认证	
SMTP 登录		SMTP 的安全连接	已禁用		
画面					
用于外观分析的位选择	关闭	用于文本和图形列表的位选择	关闭	限制值作为工具提示显示	已启用
显示脚本注释	已禁用	滚动模式	滚动条		
键盘					
使用屏幕键盘	已启用	退出时释放按钮	已禁用		
优良生产规范					
组态与 GMP 相符	已禁用				
报警					
控制器报警					
缓冲区溢出	10 %	确认组文本	QGR	报告	已启用
使用报警类别颜色	已禁用	使用系统诊断的帮助文本	已启用	系统事件的持续时间	2 秒
仅具有数字的 S7 诊断报警	已禁用	具有数字和文本的 S7 诊断报警	已禁用	SIMOTION 诊断报警	已禁用
PersistentAlarmBuffer	已启用	连接	HMI_连接_1	显示等级	0-16
用户管理					
更改初始密码	已禁用	更改注销时间	已启用	启用登录尝试限制	已启用
无效登录尝试	3	使用密码登录	已禁用	组特定权限	已禁用
密码时效	已禁用	有效期限	90	警告期限	7
密码代数：	3	至少一个特殊字符	已禁用	至少一个数字	已禁用
密码最小长度：	3	SIMATIC Logon	已禁用	应用用户管理自	WinDomain
服务器名称		端口号	16389	Windows 域	
加密的 SIMATIC Logon	已启用				

图 5-1 HMI 设备属性

5.2 根画面与主要控件

5.2.1 画面分辨率、样式与布局

根画面背景与网格参数见资料；控件分层启用，便于维护。工业画面设计应避免信息过载：压力、温度、模式与报警摘要等关键运行量应置于视觉焦点区；次要参数可置于次级区域或二级画面。颜色语义应统一：运行正常、预警、故障、禁用等状态使用固定色标，减少操作员认知负担。若后续增加趋势画面，建议与根画面通过按钮切换，保持根画面简洁。

5.2.2 5.2.2 I/O 域、文本域与变量绑定

压力调节 P/I/D 等 I/O 域与文本标签绑定 PLC 变量；格式如 99.999 与数据类型一致，防截断。绑定路径应与 PLC 符号一致，避免 HMI 侧“影子变量”与 PLC 地址漂移。对可写变量应配置最小/最大限制与权限，防止越界写入导致停机。单位显示建议在静态文本中注明，例如 MPa、℃、Hz，并与 PLC 内部单位约定一致，避免工程换算重复或遗漏。

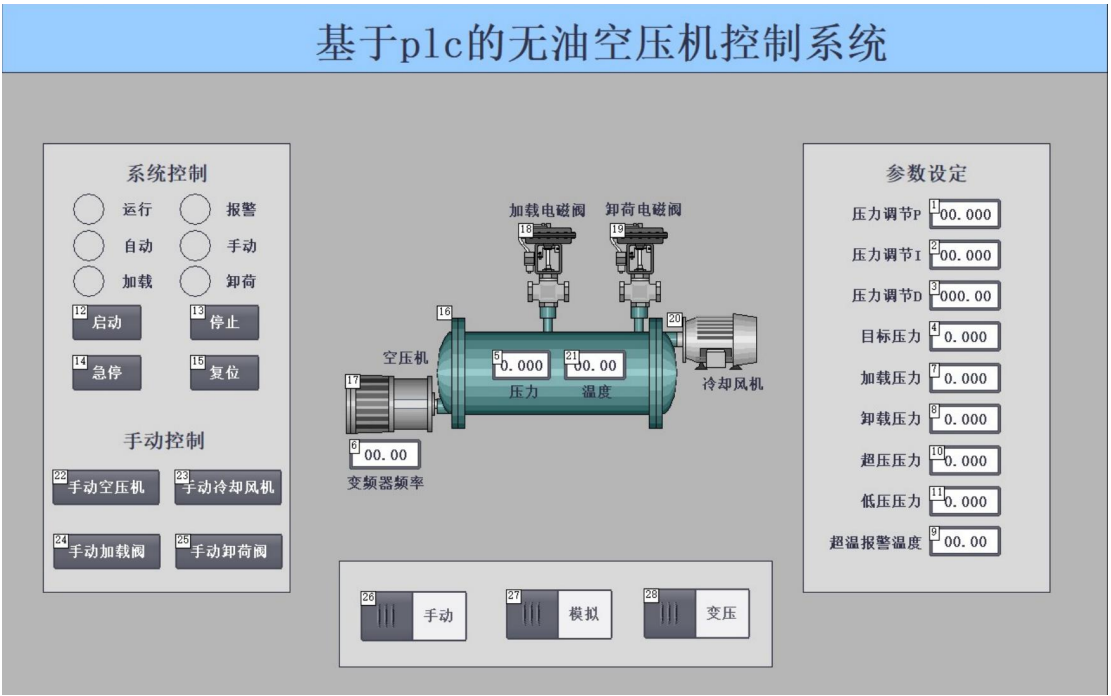


图 5-2 HMI 画面

5.3 报警、诊断与用户管理

报警缓冲与诊断选项按资料启用；无效登录次数等策略可配；关键报警建议分级与确认记录。报警文本应尽量包含“现象—可能原因—建议动作”三段式信息，便于一线人员处理。用户管理若启用密码策略，应在安全性与可运维性之间取得

平衡；密码策略过于复杂而缺乏配套管理时，反而可能增加非规范操作风险。审计功能应能追溯操作者、时间戳与被修改参数，在制药等行业常属合规要求，可在后续版本中予以扩展。

常规					
名称	根画面	背景色	182, 182, 182	网格颜色	0, 0, 0
编号	1	模板	模板_1	工具提示	
层					
活动层	0				
层_0			已启用		
层_1			已启用		
层_2			已启用		
层_3			已启用		
层_4			已启用		
层_5			已启用		
层_6			已启用		
层_7			已启用		
层_8			已启用		
层_9			已启用		
层_10			已启用		
层_11			已启用		
层_12			已启用		
层_13			已启用		
层_14			已启用		
层_15			已启用		
层_16			已启用		
层_17			已启用		
层_18			已启用		
层_19			已启用		
层_20			已启用		
层_21			已启用		
层_22			已启用		
层_23			已启用		
层_24			已启用		
层_25			已启用		
层_26			已启用		
层_27			已启用		
层_28			已启用		
层_29			已启用		
层_30			已启用		
层_31			已启用		

图 5-3 I/O 域变量连接

5.4 可读性、多语言与远程维护边界

字体对比度与报警色遵循可读性；双语需同步术语；Sm@rtServer 默认关闭，远程须安全评估。远程维护若开放，应至少采用加密隧道与强认证，并记录访问日志。对涉密或工控安全要求高的企业，可采用单向数据采集装置将数据送出控制网，而非双向控制。

第 6 章 系统调试、实验与综合分析

6.1 系统调试与故障排查

6.1.1 分步调试流程

绝缘接地→无带载点动→模拟量校验→半自动顺序→PID 整定→长试运行。
每步填表。第一步绝缘与接地是安全前提，必须在任何带电操作前完成并签字确认。第二步无带载点动用于验证 Q 点与接触器、继电器逻辑一致，避免直接带载损坏机械。第三步模拟量校验用于排除程序逻辑正确而过程量不一致的情形，须记录不少于五点的标定数据。第四步半自动顺序验证步骤链与定时器，确认 MW60/MW62 迁移正确。第五步 PID 整定应在顺序无误后进行，否则闭环会把顺序问题放大为振荡。第六步长试运行考察温升、振动与偶发干扰，建议连续运行不少于合同或规范要求的小时数。

6.1.2 典型故障与排查思路

反馈超时查触点与延时；超压误报查阻尼与消抖；温度跳变查探头与屏蔽；低压查泄漏与阀门。可补充：通信类故障在采用总线时应查终端电阻与接地；变频器故障查故障代码与主回路；电磁阀不动作查线圈供电与阀芯卡滞。排查宜采用“先易后难、先外后内”的顺序：先确认电源与接线，再怀疑程序与参数。

6.1.3 分阶段验证记录表字段设计

建议为每一阶段保存：时间戳、操作人、步骤描述、关键变量快照含 MW60 与 MW62、MD110 与 MD56 及 MD102、定时器 ET、报警代码与截图编号，便于论文附录或答辩材料引用。若学校要求附录原始记录表，可将上述字段制成表格扫描件附后。对急停、门开关等关键安全步骤，在条件允许时宜附示波器或事件顺序记录，以证明响应时间满足预期。

6.2 安全性、能效与文档交付

6.2.1 风险评估与软硬件联锁分层

PLC 软件联锁不能替代机械风险评估。急停回路若要求达到特定类别，应选用相应安全继电器或安全 PLC；门开关接入方式须符合现场危险源分析。高压极限压力开关作为硬件极限保护，其动作设定通常应比软件超压阈值更极端；二者

分层可避免“靠改阈值消报警”而越过机械极限。

6.2.2 文档交付清单

电气原理图、端子表、I/O 表、PLC 与 HMI 项目备份、操作说明书、故障代码表、备件清单、培训与验收记录。论文可作为设计说明书的学术化版本，但交付件应以企业模板为准。

6.3 运维、培训与季节性运行

6.3.1 日常点检与定期保养

日检泄漏与读数；周检端子温升与电磁阀动作；月检压差与电缆；按手册更换滤芯与密封件。点检应形成规范化检查表，对压力、温度、电流及报警历史进行记录并与基线对比；对异常振动与噪声应予以记录，必要时辅以影像存档。保养周期应与运行小时数挂钩，而非仅按日历时间：高负荷季节应缩短周期。无油机进气过滤失效会导致灰尘进入机头，表现为效率下降与温升，应作为重点检查项。

6.3.2 软件备份、备件与人员培训

改参数前备份；备接触器触点、保险、阀线圈、变送器，备件深度视预算而定；分级培训操作、维护、工程师。培训内容应包括：正常启停、急停与复位条件、常见报警代码含义、禁止操作清单，例如带压拆管、短接联锁等。对工程师还应培训 TIA Portal 在线监视、监控表使用、程序比较与归档流程。季节性参数表建议在每年入夏、入冬前各评审一次，记录环境温度与冷却水温变化对排气温度的影响。

6.4 实验测试方案与数据处理

6.4.1 实验目的、设备与工况

验证顺序、闭环、保护、HMI 联动；仪器含标准压力/温度表、钳表、电能仪，电能仪为可选配置；工况含额定、50%负荷、低负荷、阶跃。实验目的应写成可检验命题：例如“自动启动步骤 MW60 是否与资料一致”“PID 投入后压力是否稳定在目标 $\pm X\%$ ”。设备清单应列名称、型号、量程、精度与校准有效期；若借用第三方实验室，应注明环境条件与安装方式。工况划分建议至少覆盖设计工况与边界工况：夏季高温进风、冬季低温启动在工艺适用时纳入、用气阶跃可通过放空阀或额外负载模拟，实施前须完成安全评估。

6.4.2 顺序与模拟量、PID、故障注入实验

冷态初始化→自动启动步骤记录→停机与急停→通道五点标定→PID 整定→安全条件下故障注入。顺序实验建议录像或连续截图保存关键网络状态；模拟量标定应记录原始 IW 字与换算后实数，计算端点误差与线性度；PID 整定建议记录三组以上参数对比，并说明评价指标含超调、调节时间与稳态误差。故障注入应逐项填写“注入方式—预期现象—实际现象—结论”，对不符合项分析是程序问题、接线问题还是仪表问题。

6.4.3 结果表达与测量不确定度

表格列均值与方差；曲线示压力与频率；注明仪器与校准日期；单次测量需说明局限。对毕业论文图表，建议统一坐标轴单位与采样周期说明；若进行多次重复试验，应报告标准差或置信区间。对能效类指标，应说明环境温度、进气湿度与电网电压等边界条件，否则不同批次数据不可比。不确定度可依据仪表精度等级与 B 类评定给出区间估计；若需 A 类评定，应保证重复试验条件一致。图表中所有曲线均应标注图例与工况编号，以保证结果可追溯、可解释。



图 6-1 实验现场照片

6.4.4 实验安全与伦理要求

故障注入实验必须在设备允许范围内进行，禁止为追求“效果”而拆除保护装置或短接安全回路。涉及高温、高压的操作应由具备资质人员执行并遵守实验室规程。论文中引用数据须真实可溯源，不得伪造曲线与表格。若实验未能按原计划完成，应在论文中如实说明原因，包括设备、时间、权限或环境等方面的限制，并给出后续补做计划，以符合学术规范要求。

6.5 环保、节能与经济性

6.5.1 环保与洁净供气

无油供气减少油雾排放与废油处置负担，对医药与食品行业具有直接环保价值；控制系统通过减少异常停机与无效加载，间接降低能源浪费。从环境管理体系列表看，压缩空气站常属于重点用能设备；良好的控制与泄漏治理可降低碳排放强度。本文不展开碳核算，但指出：在相同排气量下，单位产气电耗下降即意味着间接减排，前提是测量边界一致。

6.5.2 节能机理归纳

变频调速改善部分负荷比功率；合理加载/卸荷带宽减少泄放与空转；维护降低内泄漏。可建立“管网压力设定变化对电耗影响”的意识，但定量结论须结合机型性能曲线与实测。另需关注“系统节能”而非“单机节能”：末端泄漏、减压阀设定过高、过滤器堵塞导致压降增大，会使机组长期运行于不利工况；控制系统能解决一部分，但不能替代管网治理。

6.5.3 经济性粗算与生命周期

投资含 PLC、模块、HMI、柜体与施工；运行含电费、维护与停机损失。回收期可粗估为增量投资除以年节电费，缺数据时论文只保留方法框架。十年尺度上，标准化编程与主流硬件有利于备件与人员技能复用。停机损失往往远大于电费节约，尤其在连续生产线；因此控制系统的可靠性指标，例如平均无故障时间与平均修复时间，在投标与验收中日益重要。论文若引用经济性，应明确边界假设，含电价、年运行小时、气价或机会成本等，避免无依据的“节能百分之多少”结论。

6.6 标准符合性、系统扩展与讨论要点

6.6.1 电气安全与压力设备相关说明

GB 5226.1 等条款对照设计；压力容器与管道监察规程独立适用；控制阈值不得突破机械极限。电气设计文件应能追溯到条款：如保护导体连续性、隔离器件、急停器件型式等。压力管道与容器的定期检验与控制系统无关但相互影响：若检验发现减薄或腐蚀，应重新评估控制压力设定。若现场存在爆炸危险区域，尚涉及防爆电气与本质安全回路，超出本文范围。

6.6.2 工业以太网、OPC UA 与预测性维护

OPC UA 可向 MES/边缘网关暴露数据；PLC 侧可计运行小时、启停次数、温度梯度异常上传预警。预测性维护的前提是数据质量与基线：若温度传感器漂移未被发现，趋势分析将失效。建议将“传感器健康度”与“机械健康度”分开建模：前者靠校准与冗余比对，后者靠振动与温度特征。边缘网关部署时应注意时钟同步与断点续传，避免网络抖动导致数据空洞。

第 7 章 结论与展望

文围绕无油空压机控制需求，完成了电气主电路及以西门子 S7-1214C 与 SM 1234 为基础的 PLC 控制系统硬件方案论述，阐明了数字量与模拟量信号路径；在 TIA Portal 环境下阐述了 OB1 顺序逻辑及 FB1、FC1 在压力闭环与数据监视中的作用，并说明了 TP1200 Comfort 人机界面的组态要点；结合工程资料对调试、实验与标准符合性问题进行了归纳。全文与主电路、PLC 接线、程序及人机界面四份 PDF 相互印证，形成自强电经控制软件至人机界面的可追溯链条。本设计将顺序联锁、模拟量标定、PID 变频调节与人机参数管理统一于同一工程框架，所得结论对同类机组自动化改造具有参考价值；同时，部分阈值与延时仍须依据现场标定与制造商资料复核，机械与热力仿真及安全完整性认证未予展开，通信型变频器在协议层的细节亦未深入讨论，故推广至不同品牌或容量设备时须重新验证，不宜直接沿用文中参数初值。

在此基础上，后续研究可从三方面延伸：其一，将变频器纳入 PROFINET 等工业以太网架构，统一时钟、诊断与能源计量，并探讨多机联控中的负荷分配及离心或螺杆机型特有的防喘振、转速同步等问题；其二，结合 MES、边缘计算与预测性维护，在现场联锁可靠的前提下实现数据上云与趋势预警；其三，在软件工程层面加强版本管理、自动化测试与半实物仿真，并在机理或数据驱动框架下开展数字孪生与控制参数优化研究。上述方向超出本文单机控制设计范畴，须与设备制造商及现场安全评估协同推进。

致谢

本论文的顺利完成，凝聚着众多师长、同窗与亲友的心血与关怀，在此我致以最诚挚的谢意。首先衷心感谢我的导师，从论文选题、研究思路梳理、框架搭建，到实验设计、内容撰写与反复修改，导师都给予了细致入微的指导与严格要求。其严谨求实的治学态度、深厚扎实的学术素养、精益求精的科研精神以及诲人不倦的育人情怀，不仅指引我攻克研究中的诸多难题，更让我树立了正确的学习与科研态度，使我在专业能力与思维视野上均得到显著提升，这份教诲与指引令我受益终身。

感谢在求学期间给予我帮助的各位老师，他们课堂上的悉心讲授与专业点拨，为我的论文研究奠定了坚实的理论基础。感谢同窗好友在学习与科研过程中的陪伴交流、思想碰撞与相互鼓励，共同度过了充实而难忘的时光。同时，我最深切地感谢家人多年来无条件的理解、包容、支持与默默付出，他们始终是最坚实的精神后盾，给予我不断前行的勇气与力量。最后，向所有关心、支持与帮助过我的人，再次致以最由衷的感谢与最美好的祝福。

参考文献

- [1]周庆霞,卿兆波,李坤鹏. 基于 PLC 控制的空气悬挂空压机等熵效率测量系统[J].现代电子技术,2025,48(06):16-22.
- [2]何章超.基于平衡优化算法改进的螺杆式空压机控制系统研究[D].合肥大学,2025.
- [3]刘宇翔,蔡文利,高霞,等. 基于 PLC 的一种空压机设备运行监控系统设计方法[J].电气时代,2025,(01):170-173.
- [4]从静,戴千府,谭旺辉. 空压机节能控制系统数智化改造研究[J].中国战略新兴产业,2025,(02):118-120.
- [5]咎勇,钱朝东.基于自动化控制元件的低压气系统动态增容改造[C]//中国电力技术市场协会.2024 年电力行业技术监督专业技术交流研讨会优秀论文集.华能澜沧江水电股份有限公司黄登·大华桥水电站,;2024:1066-1072.
- [6]王萌,唐楠,林浩.航空制造中空压设备智能化设计技术研究[C]//国防科技工业自动化测试创新中心,中国航空工业技术装备工程协会, 航空工业测控技术发展中心,中国航空学会测试技术分会.第二十一届中国航空测控技术年会论文集.中电智能科技有限公司,;2024:139-143.
- [7]马喜春. 矿用空压机节能控制系统技术改造与应用[J].江西煤炭科技,2024,(04):190-193.
- [8]杨煜,许斌. 1200PLC 在空压机组中的应用 [J]. 中国高新科技,2024,(20):81-83.
- [9]季晓伟. 某煤矿机电控制中的 PLC 技术应用实践研究 [J]. 矿业装备,2024,(10):89-91.
- [10]于世勇. 基于移动物联网的空压机智能自动控制改造研究[J].矿业装备,2024,(10):179-181.
- [11]孙莘莉. 基于 PLC 的空压机联锁控制器异常运行状态报警研究[J].今日制造与升级,2024,(08):152-155.
- [12]胡声福. 基于 PLC 的空压机组智能联控监测技术改造[J].世界有色金属,2024,(16):29-31.
- [13]王军. 55000 m³/h 空压机组控制系统优化改造小结[J].氮肥与合成

气,2024,52(07):11-12+16.

[14]李永浩,焦玉金. 螺杆式空压机故障检测控制系统设计[J]. 自动化应用,2024,65(13):176-178.

[15]徐乐乐. 空压机电机控制参数动态优化研究与应用[D]. 淮阴工学院,2024.

[16]戴志颖. 空压机控制参数在线分析算法研究与可视化[D]. 淮阴工学院,2024.

[17]周庆霞. 车用空气悬挂空压机的性能测试系统研制[D]. 中国计量大学,2024.

[18]张坤坤. 燃料电池空压机气磁轴承设计及控制研究[D]. 扬州大学,2024.

[19]邓长久. 干式磁选机智能控制系统的设计与应用[D]. 湖南理工学院,2024.

[20]王增辉. 燃料电池用高速空压机驱动系统高性能预测控制策略[D]. 山东大学,2024.