

基于 PLC 的空压机系统自控改造与优化研究

黎 钊

安徽开发矿业有限公司 安徽省六安市 237426

摘要：本文针对传统空压机系统控制方式存在的能耗高、稳定性差及自动化程度低等核心问题，提出了一套基于可编程逻辑控制器（PLC）的系统自控改造与优化方案。该方案涵盖 PLC 精准选型与硬件设计、控制策略深度优化及人机界面（HMI）的全面开发，实现了空压机启停控制、负荷智能分配、压力精准调节及故障诊断的智能化。改造后，系统能耗显著降低，压力波动范围大幅缩小，故障响应时间明显缩短，系统整体可靠性与经济性得到显著提升。

关键词：PLC；空压机系统；自控改造；负荷分配；节能优化

1. 空压机系统及其传统控制方式

1.1 空压机工作原理与关键部件

空压机作为工业领域中的核心动力设备，其核心功能在于通过机械压缩作用提升气体压力，以满足不同工艺场景对高压气体的需求。根据结构形式与工作原理的差异，空压机主要分为活塞式、螺杆式及离心式三大类。其中，螺杆式空压机凭借其高效率、低噪音及稳定运行特性，在矿山、冶金等重工业领域得到广泛应用。其工作原理基于阴阳转子的同步旋转啮合运动：阳转子与阴转子通过精密齿轮传动实现同步旋转，转子齿槽间的气体在旋转过程中被逐步压缩，最终通过排气端排出。这一过程中，润滑油不仅起到密封作用，防止压缩气体泄漏，同时通过循环冷却系统降低排气温度，避免润滑油因高温碳化而失效。螺杆式空压机的关键部件包括阴阳转子、油分离器及冷却系统。阴阳转子作为核心压缩元件，其齿形设计直接影响压缩效率与气体泄漏量，通常采用高精度磨削工艺确保齿面光洁度与配合精度。冷却系统则由油冷却器与后冷却器组成，前者通过循环冷却水降低润滑油温度，后者对排气进行二次冷却，防止高温气体对后续设备造成热损伤。

1.2 传统控制模式及缺陷

1.2.1 手动控制模式

手动控制模式作为早期空压机系统的典型控制方式，其核心逻辑依赖于操作人员对压力表读数的实时监测与手动干预。当压力表显示系统压力低于下限阈值时，操作人员需手动启动空压机；当压力超过上限阈值时，则需立即停机以防止系统过压。然而，这一模式存在显著的调节滞后问题：

由于人工反应时间与操作延迟，系统压力往往在超过上限后才触发停机指令，导致用气端压力骤降，影响生产工艺的连续性。能耗方面，手动控制模式下的频繁启停操作对电机与电网造成严重冲击。电机启动瞬间电流可达额定电流的 6–8 倍，不仅加剧电机绕组发热与绝缘老化，同时导致电网电压波动，影响其他设备的正常运行。长期来看，频繁启停导致的机械磨损与能耗浪费显著缩短设备使用寿命，增加维护成本与能源消耗。

1.2.2 继电器控制模式

继电器控制模式通过时间继电器与压力继电器的组合实现空压机的自动启停，试图解决手动控制模式的调节滞后问题。时间继电器用于设定空压机的运行时长，压力继电器则根据系统压力变化触发启停信号。然而这一模式仍存在缺陷：压力波动范围大是继电器控制模式的典型问题。由于继电器动作阈值固定，系统压力往往在超过设定上限或低于下限后才触发控制指令，导致压力波动范围达 $\pm 0.1\text{ MPa}$ ，无法满足精密生产工艺对压力稳定性的要求。故障率高是继电器控制模式的另一大弊端。继电器触点在长期使用过程中易因电弧灼烧、氧化腐蚀而失效，导致控制失灵或误动作。此外，继电器线圈的匝间短路、机械卡滞等问题进一步降低系统可靠性，增加停机风险。最后，扩展性差限制了继电器控制模式的适用范围。当系统需新增空压机或传感器时，需重新设计控制电路、增加继电器数量并调整布线，导致维护成本与复杂度显著上升。这一缺陷在大型矿山空压机站中尤为突出，制约了系统的规模化应用与智能化升级。

1.2.3 传统控制模式缺陷

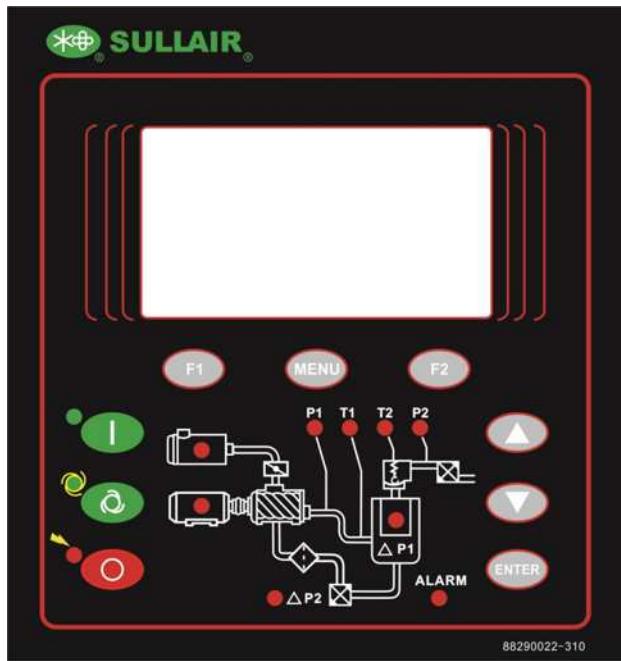
传统控制模式的长期应用导致空压机系统存在多重缺陷，亟需通过技术改造实现性能提升。首当其冲的是能耗问题：传统模式下空压机长期处于高速空载状态，机械磨损严重，能耗占比高达30%–40%，远高于变频调速控制下的能耗水平。此外，压力波动大导致用气端设备频繁启停，进一步加剧能源浪费。机械磨损方面，传统控制模式下的频繁启停与高速空载运行导致转子轴承、齿轮等关键部件承受交变载荷，加速疲劳损伤与失效。

1.3 现有控制模式与改造需求

1.3.1 当前控制模式

当前主流控制模式为微电脑控制器模式，比如寿力空压机和阿特拉斯空压机均采用这种模式。控制器通过液晶显示器LCD，显示机组实时的温度、压力、运行时间、工作状态和主电机电流等。操作人员可以通过控制器面板上的键盘来控制压缩机，设定控制参数，显示需要的参数。

系统图上的指示灯反映各显示参数所处的位置（参照图一）。灯光点亮表示报警。



图一 监控器 (VACUUM COMPRESSOR CONTROLLER) 面板

1.3.2 当前控制模式缺陷及改造需求

需要人员在现场手动操作监控器，不能远程开机，不能远程监视数据。井下空压机站点较多，需要足够人员去点检和操作，造成人力不足。

另外空压机参数不能远程设置，当井下用风压力出现变化时，参数不能及时调整造成长期加载，存在能源浪费。当用风需求量大时不能自动开启，造成供风不足，影响生产。

鉴于当前控制模式自动化程度较低，所以急需改造实现远程控制，来提高工作效率。

2.PLC 控制系统设计与实现

2.1 PLC 选型与硬件组成

PLC 选型需综合考量系统功能需求与性能指标。在输入输出配置方面，应依据压力传感器、温度传感器等输入信号类型，以及变频器、电磁阀等输出控制要求，选用具备扩展能力的模块化 PLC，如西门子 S7-1200 系列，同时预留适量冗余点位以适应未来功能升级。处理速度层面，需确保循环扫描周期满足实时控制要求，避免因处理延迟导致控制指令滞后。通信能力方面，应优先选择支持工业以太网协议的 PLC，以实现与 HMI、上位机的高效数据交互。硬件系统架构包含主电路与控制电路：主电路通过断路器、接触器将三相交流电源接入变频器，进而驱动空压机电机；控制电路则由 PLC 通过数字量模块采集启停信号，模拟量模块接收传感器数据，并输出控制信号调节变频器频率，同时配置 HMI 触摸屏、报警灯等辅助设备，构建完整的监控与报警体系。



2.2 控制系统总体架构

独立中小型 PLC 控制柜 +modbus485 通讯 + 触摸屏 + 上位机

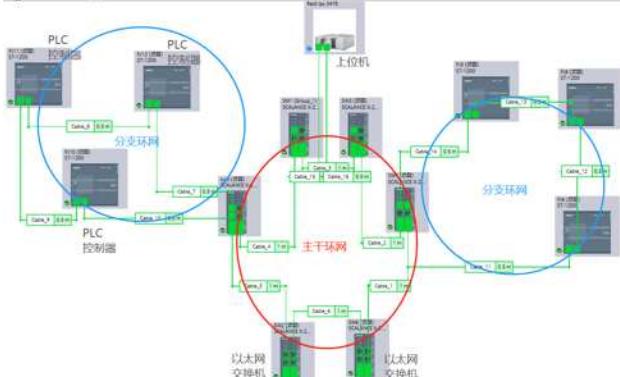
每个空压机站独立配置一套中小型 PLC 控制柜，PLC 柜现场采集空压机 485 数据和管道压力、温度等传感器数据，并通过光纤网络与地表上位机进行通讯，完成程序处理后，直接向空压机发出控制指令进行相应操作。

改造内容如下：

每个站设立一台自动化控制柜，对现场设备进行控制及和上位机进行通讯；

中控室设立工控机 1 台，彩色曲面显示器 1 台，工控机预装正版的操作系统、编程软件和组态软件；

进行组态软件开发，界面开发及调试，控制软件编制；



2.3 程序设计原则与模块划分

系统设置远程集控操作模式，操作模式切换由设备空压机微电脑控制器面板修改参数实现。如果控制室上位机掉线，不影响现场操作控制。

远程集控模式下，操作员在控制室或控制柜触摸屏操作所有设备，可实时监视所有设备的状态；当某台设备或者系统出现异常情况时，在操作界面上发出报警，并提示相关故障信息。在完成所有设备监控的同时，实现设备启停运行过程记录、操作记录，故障报警、数据存储等功能。



系统具有实时报警和历史查询功能：实时快速响应，对设备运行状态、故障做到准确显示和实时报警。实时报警可实时显示每个测点参数（如超上、下限值），发生报警时，监视屏幕会弹出报警画面，同时具备智能化信息语音提示和故障语音报警功能。



2.4 人机界面 (HMI) 设计

人机界面 (HMI) 设计遵循直观性、可操作性与数据完整性原则，采用分层架构实现功能模块化布局。主界面作为核心监控窗口，实时显示供气压力、电机转速、轴承温度等关键工艺参数，并通过动态趋势图直观呈现数据变化，便于操作人员快速掌握系统运行状态；参数设置界面集成压力设定值、PID 控制参数等可调项，采用权限分级管理机制，仅允许授权人员通过密码验证后修改参数，确保控制逻辑安全性；历史记录界面提供故障日志查询与能耗统计分析功能，支持按时间范围筛选报警事件、设备启停记录及能源消耗数据，为工艺优化与设备维护提供数据支撑。



与 PLC 进行数据通讯，具备齐全的人机对话、记录、显示功能。具有所有接入设备的统一管理能力，在远程模式下，可以实现所有接入自动化系统内的设备的集中控制及远程监视，可视化的图形界面，实时展示所有设备状态。



2.5 系统联调与调试流程

系统联调与调试流程涵盖硬件预检、软件验证及现场调优三个阶段：硬件检查阶段重点核查控制柜接线正确性，通过兆欧表检测主电路绝缘电阻，确保其符合设备安全规范；软件仿真阶段利用 PLC 编程软件构建虚拟调试环境，模拟传感器输入信号与执行机构反馈，验证控制逻辑正确性及异常处理机制；现场调试阶段以压力稳定性为核心指标，通过逐步调整 PID 参数优化控制响应，使系统压力波动范围控制在工艺允许范围内；负载测试阶段模拟连续高负荷运行工况，监测设备温升、振动及能耗指标，同步记录故障发生频率与类型，形成完整的调试报告。HMI 与 PLC 通过工业以太网实现数据交互，调试过程中通过 HMI 实时监控变量状态，快速定位逻辑错误或硬件故障，确保系统满足设计指标与工艺要求。

3. 系统优化方法研究

3.1 运行参数优化模型

针对空压机系统动态特性，构建基于粒子群算法（PSO）的参数优化模型，以单位时间能耗最低为目标函数，综合考虑压力稳定性、电机转速范围等约束条件。通过模拟粒子群在解空间中的迭代搜索过程，动态调整 PID 控制参数，使系统在满足供气压力波动要求的前提下，实现控制响应速度与能耗的平衡。优化后的参数组合经仿真验证，可显著提升系统动态性能，为后续现场调试提供理论依据。

3.2 能耗分析与节能策略

从动力传输与设备运行模式入手，提出多维度节能方案。变频调速技术通过调节电机供电频率实现转速连续控制，利用电机功耗与转速的立方关系特性，在部分负荷工况下降低机械损耗；空载节能策略通过监测用气量动态切换设备运行模式，当需求低于设定阈值时，系统自动进入

低功耗休眠状态，同时维持润滑系统循环以保障设备寿命；余热回收装置利用排气高温介质与低温生活用水进行热交换，将原本废弃的热能转化为可利用能源，显著降低辅助加热系统能耗。



3.3 可靠性提升措施

采用冗余架构与容错机制增强系统抗干扰能力。双 PLC 热备系统通过实时数据同步实现主备控制单元无缝切换，当主控制器发生故障时，备用单元可立即接管控制任务，确保系统连续运行；传感器级容错控制通过部署备用检测元件，在主传感器失效时自动启用备用信号或基于模型估算值维持控制精度；预防性维护模块根据设备运行时长、负荷特征等参数生成动态维护计划，提前更换易损件并记录维护数据，形成设备健康状态档案。

3.4 实时状态监测与数据采集方案

构建多参数融合的监测网络，在关键部位部署高精度传感器，实时采集温度、压力、振动等状态信号；数据传输层采用工业以太网与无线通信混合架构，通过 Modbus TCP 协议将现场数据上传至云端服务器，支持多终端实时访问；数据分析平台集成机器学习算法，对历史运行数据进行特征提取与模式识别，建立设备退化预测模型，实现故障早期预警与维护决策优化，为系统全生命周期管理提供数据支撑。



4. 结束语

本文针对空压机控制系统，通过粒子群算法优化运行参数，结合变频调速、余热回收等节能技术，有效降低了系统能耗；采用冗余设计与容错控制策略，提升了系统运行的可靠性；同时，构建了多参数实时监测网络与机器学习驱动的数据分析平台，实现了设备状态的精准感知与故障预警。理论验证与工程实践表明，所提方法可显著提升系统综合性能。未来研究可进一步探索人工智能算法在动态参数整定中的应用，为工业空压机智能化升级提供更高效的技术路径。

参考文献：

- [1] 罗凤菊 . 空压机自控系统改造的设计与实现 [J]. 冶金动力 ,2012,(03):69–70.
- [2] 李辉 , 罗登玲 , 刘细辉 , 等 . 空压机系统健康预警平台的实现 [J]. 仪器仪表与分析监测 ,2025,(03):13–21.
- [3] 陈涵 . 基于知识的空压机智能设计方法研究与原型系统实现 [D]. 盐城工学院 ,2025.

作者简介：黎钊，1987-4，男，汉族，湖南湘阴，高级工程师，大学本科硕士，研究方向：矿山智能化、矿山装备状态监测与系统管理