

# 基于 PLC 的二氧化碳增压设备的控制系统设计

谢鑫磊

(中石化石油机械股份有限公司数智装备与材料创新研究分公司, 湖北 武汉 430030)

**摘要** 为满足油田现场对二氧化碳增压过程精度与效率的当前需求, 在某厂现有二氧化碳增压泵车的基础上, 针对其信息化集成度低、自动化水平不足等问题, 设计了一套控制系统。该系统以西门子罗克韦尔 1756PLC 为核心进行逻辑处理, 通过 J1939 协议实现与发动机的通信, 并借助压力与温度传感器的实时反馈, 完成了对增压泵速度的精确控制以及增压过程中压力与排量的自动调节。同时, 利用北尔上位机实现了生产数据的实时可视化。应用结果表明, 该控制系统有效提升了二氧化碳增压的效率和精度, 进一步提高了设备自动化水平。

**关键词** PLC; 二氧化碳增压设备; 控制系统

中图分类号: TP273; TH87

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.039

## 0 引言

将二氧化碳注入地层中, 二氧化碳可以渗透进入地层之间的微小空隙<sup>[1]</sup>, 并且能够溶解于原油之中, 改善原油与水的流度比、降低油水界面张力, 降低原油的黏度, 增大原油的体积, 从而提高采收率<sup>[2]</sup>。并且有一部分二氧化碳还可以永久的保存在底层之中。随着绿色石油的开采需求加强, 这种可以增加采收率的 CCUS 技术得到了广泛的应用<sup>[3]</sup>, 但在使用压裂车向地层中泵送液态二氧化碳的过程中, 保证注入的流量和保持二氧化碳的液态状态<sup>[4]</sup>, 必须将储存罐中的液态二氧化碳先进行增压, 于是开发了基于 PLC 的二氧化碳增压设备的控制系统。该系统可以控制从罐体到增压出口的管线阀门, 并且可以增加液体二氧化碳的压力到设定数值, 从而达到运输储存罐中的二氧化碳和增压二氧化碳的双重作用。

## 1 二氧化碳增压设备控制方案

整体设备分为动力系统、管线控制系统、气液分离系统和增压系统四个部分构成, 动力系统通过控制发动机带动液压泵产生液压压力, 从而给各个部件提供液压动力。管线控制系统可以控制各个蝶阀的开关, 从而控制二氧化碳在整个设备中的流路路径。气液分离系统可以将气态的二氧化碳排出, 维持二氧化碳的液态状态。增压系统可以通过离心泵的作用, 提高二氧化碳液体的压力, 从而达到增压的目的。

## 2 二氧化碳增压设备控制系统硬件设计

### 2.1 系统总体架构

本控制系统采用三层分布式架构, 确保了控制的实时性、系统的可扩展性以及人机交互的便捷性。

1. 控制层: 作为系统的控制核心, 由可编程逻辑控制器 PLC 构成, 负责执行实时数据采集、逻辑运算、闭环控制算法及安全联锁保护<sup>[5]</sup>。它直接与现场的传感器和执行机构交互, 是确保工艺过程稳定的关键。

2. 监控层: 由触摸屏 HMI 组成, 运行数据采集与监控软件。它为操作员提供直观的工艺流程图、实时和历史数据趋势、报警管理和参数设置界面<sup>[6]</sup>, 是实现高级监控和数据分析的平台。

3. 设备层: 包括所有的现场仪表和执行机构, 负责物理信号的转换与动作的执行。各层级之间通过工业以太网进行高速数据通信, 形成一个信息集中、控制分散的有机整体, 保证了数据流从采集、处理到显示的稳定与高效<sup>[7]</sup>。

### 2.2 硬件平台选型

结合二氧化碳增压控制系统的控制需求, 通过对燃油液位、液压油温、离心泵 1 的压力和排量、离心泵 2 的压力和排量、分离器的温度和压力、蓄电池充电电流等共计 9 个模拟量输入传感器。为控制离心泵 1 和离心泵 2 的转速和发动机的转速, 共需要模拟量输出 4 个。本设备一共有 28 个启动蝶阀和一个电动蝶阀,

作者简介: 谢鑫磊 (1994-), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 自动化控制。

加上报警系统一共需要数字量输入 74 个, 数字量输出 45 个。根据所需的要求, 设计电气控制硬件 (如表 1 所示)。PLC 使用罗克韦尔的 1756 型号。

表 1 控制系统硬件详细配置表

序号	名称	说明
1	电源	1756-PB72
2	CPU	1756-L71
3	终端模块	1756-EN2T
4	模拟量输入模块	1756-IF16
5	开关量输出模块	1756-OB32
6	模拟量输出模块	1756-OF8
7	开关量输入模块	1756-IB32
8	数字量输出模块	1756-OW16I
9	高速开关量输入模块	1756-IB16IF
10	交换机	EDS-508A-T

### 3 二氧化碳增压设备控制系统软件架构与核心算法设计

#### 3.1 软件分层架构设计

1. 设备驱动层。为全面采集设备运行状态, 该控制系统针对不同物理量采用相适应的信号采集方案。压力与温度传感器输出抗干扰能力强的 4~20 mA 标准模拟电流信号。转速测量则利用磁电式传感器。核心的发动机运行参数, 如燃油率、扭矩、故障代码等, 严格遵循 SAE J1939 车辆网络协议, 通过 CAN 总线以参数组 (PGN) 和特定参数 (SPN) 的形式进行结构化、高效率的通信。所有数据由控制器实时汇总与处理, 最终通过高速的 EtherNet/IP 工业以太网协议与上位机监控平台集成, 实现了数据的高速、可靠传输与系统的集中化智能管理。

2. 控制逻辑层。本系统依据设备关键性与控制复杂度, 实施了精细化分级控制策略, 以实现安全、稳定与高效的运行。对于工艺流程中的普通阀门, 采用基于人机交互屏幕的手动控制模式, 为操作人员提供直接、灵活的干预能力。气液分离器的排液控制则采用了基于液位阈值的自动逻辑控制: 当液位传感器检测到液位达到预设上限时, 系统自动开启排液阀; 当液位下降至下限时则自动关闭, 从而可靠地实现了“上限开阀、下限关阀”的自动循环, 保障了分离效果与容器安全。对于出口压力稳定性要求极高的增压泵, 系统部署了先进的 PID 闭环控制。该回路以压力传感器实时监测的出口压力作为反馈值, 与系统设定

的目标压力值进行持续比较, 计算出实时偏差。此偏差信号经过 PID 控制器的比例、积分、微分三环节综合运算, 得到优化的控制量并输到离心泵的液压流量控制阀, 形成一个连续的、自我校正的控制闭环。这种策略能够快速抑制系统内外部扰动, 实现对出口压力的高精度、自适应稳定控制, 显著提升了整个流体输送过程的动态品质与可靠性。

#### 3.2 下位机 (PLC) 核心控制算法

1. 自适应 PID 压力控制。为对实现增压泵的精细化控制, 本文设计了一套集成转速、流量与压力三重控制目标的智能解耦控制策略。该系统可根据实际工艺需求与用户设定, 自动识别并切换至最优控制变量。其核心在于构建了相互解耦的三条独立 PID 控制回路, 分别对应泵的转速、管道流量及出口压力。控制器依据所选模式, 实时采集相应传感器数据, 与设定值进行比较, 并通过 PID 算法动态调整变频器输出, 从而精确调节水泵运行状态。该架构不仅确保了在不同工况下总能维持关键参数的稳定, 也通过模式间的无缝切换, 显著提升了系统的适应性、控制精度与整体能效。

2. 智能本地远程逻辑。本设备可通过以太网链接设备, 在远离井场 50 m 的范围内对设备进行控制。系统设计实现了本地控制与远程控制模式间的无缝切换, 核心在于采用具备“起一保一停”功能的互锁逻辑。该设计不仅能智能维持阀门等执行元件的控制状态, 防止意外复位, 更通过硬件与软件的双重互锁机制, 确保本地与远程两端指令可并行接入且互不干扰, 从根本上杜绝了控制权冲突与信号紊乱, 保障了控制系统的唯一性与操作安全, 提升了整体控制的灵活性与可靠性。

3. 安全联锁保护策略。本系统集成了一套多层次的安全监测与自动保护机制, 旨在保障人员与设备安全。系统可实时监测作业环境中的二氧化碳气体密度, 一旦检测到浓度超过预设安全阈值, 将立即触发声光报警, 并自动执行设备急停, 从而有效防止人员窒息或中毒风险。同时, 系统持续监控发动机冷却水温度, 若出现异常高温, 将及时报警并可根据设定采取降载或停机等保护措施, 避免发动机因过热而损坏。此外, 系统还对关键设备的温度和压力运行状态进行实时监控, 当任何参数超出正常工作范围时, 系统会即刻启动对应的超限报警, 提醒操作人员干预, 显著提升了整体运行的安全性与可靠性。

#### 3.3 上位机 (HMI) 监控软件设计

1. HMI 整体设计。本系统的人机界面 (HMI) 采用北尔电子品牌的高可靠性工业级触摸屏进行设计与实

现。HMI 通过 EtherNet/IP 工业以太网协议，直接访问 PLC 中对应的数据地址。系统利用 HMI 平台内置的数据记录器功能，自动、持续地存储关键过程变量的历史数据；同时，借助灵活的曲线控件，能够在屏幕上实时绘制并动态刷新所选变量的趋势曲线，为运行状态监测与工艺分析提供直观依据。通过对按钮、指示灯、输入框、选择开关等多种可视化控件的组合设计与逻辑关联，最终在 HMI 上实现了对现场设备的集中监控、参数设置与流程控制。

2. 信息屏面。系统上电后，主监控信息界面将作为默认首页自动加载并显示。该界面集中呈现了整套动力与流体系统的关键实时运行参数，为操作人员提供最直接、全面的状态总览。核心显示参数包括：发动机的实时转速；环境与工作介质的关键指标，如二氧化碳密度与液压油温；气液分离单元的运行状态，包括分离器温度与压力；两台增压泵的详细工作数据涵盖每台泵的出口压力、实时排量与运行转速。所有数据通过清晰的数字形式进行可视化，确保系统运行状况一目了然，该界面是进行实时监控与高效操作决策的首要信息枢纽。

3. 操作屏面。操作屏面是二氧化碳增压自动控制系统的操作与监视屏面。主屏面显示设备上的所有管线和阀门以及两个增压泵，二氧化碳分离器。显示的主要参数有发动机转速、二氧化碳密度、液压油温、分离器温度。点击对应的阀门编号，即可完成对阀门的手动开关工作。下方的菜单中点击急停，设备紧急停机，点击计算机 / 手动控制切换选择面板操作或者触摸屏操作。点击远程控制 / 本地控制选择是否在本地进行操作。点击开始 / 停止控制增压泵是否运转。排量模式、压力模式、转速模式可以选择增压泵的控制方式。

## 4 实验结果

### 4.1 测试方案

本次系统的验证工作采用了分阶段、由内至外的完整测试策略，即工厂内仿真测试与井场现场实测相结合，全面、递进地考核了系统的可靠性、功能完备性与工况适应性。

首先，在工厂内测试阶段，通过改变工艺流程管路搭建了二氧化碳内循环试验环境。在此受控环境下，对控制逻辑、安全联锁、数据采集与通信、人机交互等基础功能进行了充分验证与调试，确保系统逻辑正确、响应准确，为现场应用奠定了坚实的基础。

其次，在井场实际测试阶段，系统被部署至真实

作业环境，并先后在 2 口试验井上进行了累计 20 个轮次的增压测试。该阶段重点考核了系统在真实压力波动、介质特性变化、环境干扰及长时间连续运行等复杂工况下的长期运行稳定性、环境适应性与控制精度。实测结果系统性地验证了系统设计的有效性，并为进一步优化提供了宝贵的现场数据。

通过这种从实验室到现场、从功能到性能的逐级验证，全面证明了系统满足设计目标与实用化要求。

### 4.2 现场结果

记录现场得到的数据，得到以下的测试结果：在速度模式下，可以在 10 s 内完成速度控制收敛，转速的波动控制在  $\pm 5$  rpm；在压力模式下，可以在 30 s 内完成压力的控制收敛，压力的波动控制在  $\pm 20$  psi；在流量模式下，可以在 30 s 内完成流量的控制收敛，流量的波动控制在  $\pm 0.2$  L/min。

## 5 结束语

本文设计的二氧化碳增压泵车控制系统是一款增压泵车的自动控制系统，实现了二氧化碳增压泵自动压力、排量转速控制、底盘发动机控制和二氧化碳浓度报警等功能，对整个设备状态进行了监控。该系统以罗克韦尔 1756PLC 完成数据收集和逻辑处理，以压力传感器和温度传感器的实时数据为反馈，将设备运行状态实时传输到控制端，提高了设备的效率和自动化程度，同时也便于作业过程中的数据分析。目前，该系统在某油田现场投入使用，设备运行稳定，达到了预期效果。

## 参考文献：

- [1] 熊颖,陈鹏飞,蒋锐,等.超临界 CO<sub>2</sub> 压裂液增稠剂的制备及性能评价[J].石油与天然气化工,2025,54(06):77-82.
- [2] 党冬红,南炜通,樊柏辰,等.干热岩储层超临界 CO<sub>2</sub> 压裂缝内动态流动传热特性研究[J].石油钻采工艺,2025,47(06):729-738.
- [3] 程杰成,孙天一,王刚,等.古龙页岩油 CO<sub>2</sub> 试注试验[J].大庆石油地质发,2025,44(06):21-30.
- [4] 季军美,王旭.深层常压页岩气前置 CO<sub>2</sub> 辅助水力压裂工程实践[J].石化技术,2025,32(06):260-263.
- [5] 刘景芝.基于 PLC 的分布式变频器同步调速控制方法[J].汽车电器,2025(12):133-135.
- [6] 蒋炳南.基于 PLC 的无负压恒压供水系统设计[J].工业控制计算机,2025,38(09):158-159,161.
- [7] 刘璐.基于 PLC 的无人抓钢机控制系统设计与实现[J].今日制造与升级,2025(10):80-83.