

# 基于PLC的电驱压裂橇分布式控制系统设计与实现

罗 冲

四机赛瓦石油钻采设备有限公司 湖北 荆州 434000

**摘要：**随着石油天然气行业的不断发展，压裂技术作为提高油气采收率的关键技术之一，得到了广泛应用。电驱压裂橇作为压裂作业的核心设备，相比传统的柴驱压裂设备，具有更高的效率、更低的能耗以及更灵活的操作性能。然而，电驱压裂橇的工作环境通常较为恶劣，工况复杂多变，对其控制系统提出了更高的要求。

**关键词：**PLC；电驱压裂橇；分布式控制系统；自动化；稳定性；故障诊断

引言：传统的集中式控制系统在面对电驱压裂橇的复杂控制任务时，存在可靠性低、扩展性差等问题。分布式控制系统由于其具有结构灵活、可靠性高、易于扩展等优点，成为电驱压裂橇控制系统的理想选择。可编程逻辑控制器（PLC）作为一种工业控制计算机，具有抗干扰能力强、编程简单、维护方便等特点，在工业控制领域得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。

## 1 分布式控制系统结合 PLC 技术在电驱压裂橇控制中的优势和必要性

分布式控制系统（DCS）结合PLC技术应用于电驱压裂橇控制，具有显著优势与必要性。在优势方面，分布式架构通过将控制功能分散至多个PLC节点，避免单点故障，大幅提升系统可靠性，满足压裂作业连续运行需求<sup>[2]</sup>。PLC的高抗干扰能力与实时处理性能，确保在复杂电磁环境下精确控制压裂泵组、管汇系统等关键设备。同时，系统可根据压裂橇规模灵活扩展节点，降低初期投资与后期升级成本。

这种结合的必要性体现在：电驱压裂橇需同步控制多台电机、泵组及阀门，传统集中式控制难以满足数百个I/O点的实时性要求；分布式PLC架构通过现场总线实现数据高速交互，支持压裂参数动态调整与设备协同作业。此外，模块化设计便于故障诊断与维护，缩短停机时间，提升作业效率，是电驱压裂橇智能化升级的必然选择。

## 2 系统总体设计

### 2.1 系统需求分析

功能需求上，系统需实现对压裂压力、排量等关键参数的精确控制，通过实时采集数据并进行分析处理，

**作者简介：**罗冲（1986年12月12日—），男，汉族，湖北省仙桃市人，本科，2010年7月毕业于武汉工程大学计算机科学与技术专业，电子工程师（中级），研究方向：自动化控制。

确保压裂作业符合工艺要求；对设备的电机、泵组等关键部件进行状态监测，及时发现异常低油压、高油温等故障隐患；同时，构建完善的安全保护机制，在出现超压、过载等危险情况时，迅速触发报警并采取降排量或停机等保护措施。性能需求方面，要求系统具备极高的实时性，能在毫秒级时间内完成数据采集与指令响应；拥有高可靠性，在恶劣环境下稳定运行；还需具备良好的可扩展性，方便后续增加设备或功能模块，以适应不同作业场景需求。

### 2.2 分布式控制系统架构设计

基于PLC的电驱压裂橇分布式控制系统总体架构分为三层。上位机监控层采用工业级触摸屏或工控机，提供友好的人机交互界面，操作人员可实时查看系统运行状态、设置参数和下达控制指令；PLC控制层由多个PLC控制器组成，负责接收上位机指令，采集现场设备数据，执行逻辑控制任务；现场设备层涵盖各类传感器、执行器等，用于感知设备运行参数并执行控制动作。各层之间通过工业以太网Ethernet/IP通信协议实现数据交互，上位机监控层将控制指令发送至PLC控制层，PLC控制层处理后向现场设备层下达操作命令，同时现场设备层将采集的数据上传至PLC控制层，再反馈给上位机监控层，形成闭环控制<sup>[3]</sup>。

### 2.3 PLC选型与配置

根据系统需求，选用罗克韦尔Allen-Bradley 1756-L71系列PLC。该系列PLC具有强大的运算能力和丰富的通信接口，能够满足电驱压裂橇复杂的控制逻辑和大量数据处理需求，且具备高可靠性和稳定性，适应恶劣工业环境。硬件配置上，CPU模块选用ControlLogix5571型号，其处理速度快，支持多种通信协议；输入输出模块根据实际需求选择数字量输入输出模块和模拟量输入模块，用于采集传感器信号和控制执行器；通信模块配置以太网通信模块1756-EN2T和MOXA MGate5105通信模块，

实现与上位机和现场设备的高速稳定通信，确保系统数据传输的及时性和准确性。

### 3 硬件系统设计

#### 3.1 现场设备选型与连接

电驱压裂橇的现场设备选型以性能适配、可靠性高为原则。电机选用大功率、高扭矩的异步电机，满足压裂作业高负荷需求；变频器需具备宽调速范围和精准控制能力，保障电机稳定运行；传感器涵盖压力、流量、温度等类型，要求高精度、响应快，实时监测关键参数。在连接方式上，电气连接方面，电机、变频器与PLC通过动力电缆和控制电缆相连，传输驱动信号与控制指令；通信连接方面，电机、变频器与PLC通过通讯电缆相连，通过部署MOXA MGate5105工业网关，建立ModbusTCP（变频器端）与Ethernet/IP（PLC端）的双向协议转换通道，报文传输周期  $\leq 100\text{ms}$ ，确保设备状态信息及时上传和控制指令准确下达。

#### 3.2 电源系统设计

系统电源供应采用分层冗余设计方案。主电源由工业级开关电源提供，满足各设备额定电压与功率需求，配备UPS，UPS控制单元带有相应的电池模块，与供电单元形成一个完整的直流UPS系统。正常运行时，UPS控制单元的输入电压与负载直接相联。出现主线故障（直流输入电压锐减）时，系统转用电池供电<sup>[4]</sup>。主线供电恢复后，系统转回正常运行状态，内置充电器对电池充电至饱和。输入侧集成浪涌保护与隔离变压器，输出分多路独立配电回路。为防止过压、过流和短路等故障，在电源输入端设置浪涌保护器、过流过载保护电路，实时监测电流电压，一旦异常立即切断电源。此外，采用隔离变压器对电源进行隔离，减少电网干扰，为PLC、传感器等核心设备提供纯净稳定的供电环境，确保系统可靠运行。

#### 3.3 硬件抗干扰设计

电驱压裂橇工作环境中，电磁干扰主要来源于电机、变频器等大功率设备，机械振动则因设备运行产生。针对电磁干扰，对信号传输线路采用屏蔽电缆或加装滤波装置，滤除高频干扰信号。对于机械振动干扰，通过弹性减震垫安装PLC设备和传感器，减少振动传递。在接地设计上，采用独立接地与联合接地相结合的方式，变频器、主电机等单独接地，同时整个系统与接地网可靠连接，降低地电位差干扰，提升系统抗干扰能力。

### 4 软件系统设计

#### 4.1 PLC程序设计

采用梯形图与结构化文本相结合的编程语言进行PLC程序编写。压裂参数控制模块根据预设的压力、排量等

参数，作业开始后，系统根据用户设定压裂泵的输出排量，自动调节变频器输出以驱动电机，快速达到用户设定排量，精准控制压裂过程；设备状态监测模块持续采集传感器数据，将电机转速、温度、压力等信息进行实时处理与存储；故障诊断与处理模块对采集数据进行分析，一旦检测到异常数据，如柱塞泵压力超上限、电机轴承、绕组温度过高等，立即触发报警，并根据故障类型执行相应的停机或保护动作，同时将故障信息上传至上位机。各功能模块采用模块化编程思想，通过子程序调用实现程序结构化，便于调试与维护。

#### 4.2 上位机监控软件设计

##### 4.2.1 开发平台与界面设计

选用iX Developer作为上位机开发平台，依托其强大的工业控制界面开发能力和稳定的数据处理性能。采用分层设计理念构建人机界面：主界面集中展示系统关键运行参数及核心控制功能，实时呈现电驱压裂橇工作状态，确保操作便捷性；二级功能页面细分为变频器参数监控、辅电机控制、系统参数配置等多个专业化功能模块。界面元素遵循人机工程学设计原则，使用蓝色系作为主色调传递专业与信任感，通过卡片式布局和阴影效果增强视觉层次感。关键参数采用动态仪表盘可视化组件展示，确保操作人员能够快速获取核心数据。

##### 4.2.2 通信实现与实时监控

基于Ethernet/IP协议实现上位机与PLC的通信，建立高效稳定的数据传输通道。设计专门的数据采集模块，按照不同参数的重要性和更新频率设置差异化的采集周期：关键压裂参数如柱塞泵压力、流量采用50ms的采集频率，设备状态信息如电机轴承温度、绕组温度数据采用200ms采集频率。开发实时数据处理引擎，对采集的数据进行滤波、换算和异常值检测，确保显示数据的准确性。在界面上通过颜色变化、闪烁提示等方式突出显示异常参数，同时将历史报警信息存储至上位机的数据库，支持报警的追溯。

##### 4.2.3 远程控制功能设计

构建安全可靠的远程控制体系，设置多级权限管理机制，确保只有授权人员能够执行关键操作。设计参数设置模块，允许操作人员通过按键、数字输入框等控件调整压裂压力、泵组转速等关键参数，系统自动进行参数有效性验证，防止非法输入。开发设备控制模块，提供直观的启停按钮和状态指示灯，支持单设备控制和联动控制两种模式。在执行重要操作前，系统会弹出二次确认对话框，防止用户误操作。同时，设计紧急停机按钮，在出现重大安全隐患时能够迅速对所有电驱压裂橇

进行急停操作，保障人员和设备安全。

#### 4.3 基于软硬件冗余的急停功能设计

急停功能通过硬件与软件协同实现，确保系统在异常情况下安全停机。急停回路采用常开触点设计，由急停开关（常闭）、触点1和触点2串联组成，连接本地撬与VFD房。正常运行时，PLC得电，继电器吸合使触点1、2闭合，VFD房无急停信号。软件急停触发时，继电器失电，触点1、2断开，VFD房执行急停，同时通过网络发送急停指令；硬件急停（面板开关动作）直接切断回路，强制停机。若PLC或控制柜断电，继电器失电导致触点1、2断开，VFD房接收急停信号并执行停机，确保断电情况下系统安全。该设计通过多重冗余机制保障急停可靠性。

### 5 系统测试与优化

#### 5.1 测试环境搭建

系统测试需搭建完备的软硬件环境。硬件方面，准备模拟电驱压裂撬运行的电机、变频器、各类传感器及执行器等设备，采用与实际工况相近的参数配置；同时配备高精度的测量仪器，如万用表、测温枪、测速仪等，用于采集和验证系统运行数据。软件工具上，使用PLC编程软件进行程序调试，借助上位机监控软件的调试功能监测数据交互；引入网络抓包工具，对通信数据进行分析。将硬件设备按实际系统架构连接，安装部署好软件工具，模拟真实工作场景，搭建起涵盖数据采集、控制、通信全流程的测试平台，为后续测试提供可靠环境。

#### 5.2 功能测试

对系统各功能模块进行全面测试。针对压裂参数控制功能，设置不同压力、排量目标值，观察系统是否能够自动调节电机转速，达到设置的目标排量；设备状态监测功能测试中，人为模拟传感器数据异常，验证系统能否及时准确采集和存储设备状态信息；故障诊断与处理功能测试时，触发超压、油压低、油温高等故障场景，检查系统报警响应速度、保护动作执行情况以及故障信息上传的准确性。通过模拟各类工况，记录压裂参数变化、设备状态数据、报警时间等测试数据，分析系统在功能实现上的偏差与不足，如控制延迟、数据采集误差等问题，为系统优化提供依据。

#### 5.3 性能测试

从实时性、可靠性、稳定性三方面开展性能测试。实时性测试通过测量系统对指令的响应时间、数据采集与处理周期，评估其是否满足毫秒级响应需求；可靠性测试模拟长时间连续运行、频繁启停等工况，统计系统故障次数与平均无故障时间；稳定性测试则在高温、电

磁干扰等恶劣环境下运行系统，监测参数波动与设备运行状态。依据测试结果，分析存在的性能瓶颈，如通信延迟影响实时性、硬件散热不足导致稳定性下降等问题，为后续优化明确方向，确保系统性能符合设计要求。

#### 5.4 系统优化措施

##### 5.4.1 PLC程序优化

当前PLC程序已实现了一键备机功能，能够自动启动工作所需的辅助电机，但在主电机控制方面仍需人工干预，用户需手动启动主电机并逐步调整排量。为进一步提升自动化水平，本研究提出一种优化方案，旨在实现“一键压裂”功能。具体而言，用户仅需预设目标排量，系统即可自动完成辅助电机的启动与状态检测。待辅助电机运行正常后，PLC程序将自动控制主电机调速，使其逐步达到预设排量值，从而减少人工操作环节，提高生产效率与系统可靠性。该优化不仅简化了操作流程，还降低了人为误操作的风险，为工业自动化控制提供了更高效的解决方案。

##### 5.4.2 硬件参数调整与电路改进

对传感器信号调理电路进行优化，在压力传感器输入端增加二阶低通滤波器，截止频率设置为200Hz，有效抑制高频干扰信号，使压力测量精度从 $\pm 0.5\%$ 提升至 $\pm 0.2\%$ 。在通信线路中增加共模扼流圈，提高抗干扰能力。改进电源管理模块，在PLC电源输入端增加浪涌保护电路和DC-DC隔离模块，使系统能够承受 $\pm 15\%$ 的电压波动，保障关键设备稳定供电。

##### 5.4.3 通信协议优化与网络架构改进

采用数据压缩算法优化通信数据格式，将32位浮点数转换为16位整形数表示，在保证数据精度的前提下使单个数据包大小减少40%。改进ModbusTCP（变频器端）与Ethernet/IP（PLC端）的数据交互协议，增加数据确认机制和超时重传机制，当发送方在100ms内未收到确认帧时自动重发数据，将通信丢包率从0.3%降低至0.05%。优化网络拓扑结构，采用环形冗余网络设计，当主通信线路出现故障时，系统能够在20ms内自动切换至备用线路。开发通信负载均衡算法，根据不同通信任务的优先级动态分配网络带宽，保障关键控制指令的实时传输，使系统整体通信效率提升30%。

### 结语

本文成功完成基于PLC的电驱压裂撬分布式控制系统的设计与实现。通过对系统需求深入分析，构建了包含上位机监控层、PLC控制层和现场设备层的分层架构，并完成硬件选型、电源设计、抗干扰措施等硬件开发，以及PLC程序编写、上位机软件设计、基于软硬件冗余的急

停功能设计等软件研发工作。经测试环境搭建与功能、性能测试验证,系统各项功能达到设计要求,具备良好的实时性、可靠性与稳定性,并针对测试问题提出优化方案,有效提升系统性能。该系统的成功应用,不仅为电驱压裂橇的高效稳定运行提供技术保障,也为同类工业控制系统的设计提供参考。

#### 参考文献

- [1]王明远.基于PLC的电驱压裂橇分布式控制系统硬件优化设计[J].石油机械工程,2023(8):45-51.
- [2]李建国.电驱压裂橇分布式控制系统中PLC通信协议研究[J].工业控制计算机,2023(12):78-83.
- [3]张晓峰.基于PLC的电驱压裂橇分布式控制系统抗干扰策略[J].自动化仪表,2024(2):33-39.
- [4]陈丽华.电驱压裂橇分布式控制系统PLC软件架构设计[J].石油化工自动化,2023(6):56-62.