

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2023.06.007

以高压气体为动力的水压施加装置与控制系统设计

吴磊¹, 赵子仪^{2*}, 李天义¹

(1. 南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 中车城市交通规划设计
研究院有限公司, 江苏 南京 211800)

摘要: 稳定水压供给设备是岩石力学水力耦合试验的关键装置, 以高压气体为动力设计的水压施加装置具有压力稳定、能耗低的优点。本文以 PC 为上位机, 西门子 S7-1200 为下位机设计了一种以高压气体为动力的压力控制系统。系统中 PLC 采集数据与上位机目标压力值实时交互, 通过自动控制电磁阀开闭实现高压气体输入量的动态调控, 待系统内水压接近设定目标值后, 再由控制系统启动电动试压泵精准调压至设定目标值。

关键词: 高压气体; 稳定水压; PLC; 自动控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

文章编号: 1673-0062(2023)06-0050-06

Design of Water Pressure Application Device and Control System Powered by High Pressure Gas

WU Lei¹, ZHAO Ziyi^{2*}, LI Tianyi¹

(1. School of Resources Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; CRRC Urban Transportation Planning Design and Research Institute Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211800, China)

Abstract: The stable water pressure supply device is a key device for rock mechanics hydraulic coupling test, the water pressure application device designed with high pressure gas as power has the advantages of stable pressure and low energy consumption. In this paper, the pressure control system powered by high pressure gas is designed with PC as the upper computer and Siemens S7-1200 as the lower computer. In the system, PLC collects data and interacts with the target pressure value of the upper computer in real time, and realizes the dynamic adjustment of the input amount of high-pressure gas by automatically control-

收稿日期: 2023-07-20

基金项目: 湖南省教育厅重点项目(21A0272)

作者简介: 吴磊(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事自动控制方面的研究。E-mail: 276153909@qq.com。* 通信作者: 赵子仪(1998—), 男, 硕士, 主要从事水力耦合下岩体断裂机制方面的研究。E-mail: 2998027092@qq.com

ling the opening and closing of the solenoid valve, After the water pressure in the system is close to the set target value, the control system starts the electric pressure test pump to precisely adjust the pressure to the set target value.

key words: high pressure gas; stable water pressure; PLC; automatic control

0 引 言

裂隙岩体在水力耦合场中的力学响应特征与破坏规律,是分析深部岩体稳定性的重要依据,而稳定水压供给设备是裂隙岩体水力耦合实验顺利开展的先决条件,对稳定水压供给设备的研发有着重要的学术价值和经济效益。目前现有的稳定水压供给设备加压方式大致分为如下两种:手动加压泵和伺服泵加压,两种加压方式都采用增压泵直接给液体加压的方式提高压力^[1-4]。水力耦合试验加载过程中,特别是岩石试件产生细观微裂纹扩展的加载后期,水压波动不易控制,水力耦合作用环境对裂隙岩体力学响应过程有干扰和影响。

课题组基于气体保压特征,设计了以高压气体为动力的水压施加装置^[5],采用可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)设计调压装置,进而实现试验气体压力的自动控制,试验测试结果表明:该装置保压性能稳定、精度高、能耗低,验证试验中所开发控制系统以西门子 S7-1200 为核心控制单元,基于 C#语言开发具有数据采集、状态监测、实时响应等多种功能的自动控制系统。另外,为实现试验过程中液体压力的精准控制,利用模糊比例微分积分(proportional-integral-derivative, PID)控制对电动试压泵泵入的液体体积进行优化监控^[6-8],以维持水力耦合试验加载后期的液压稳定。

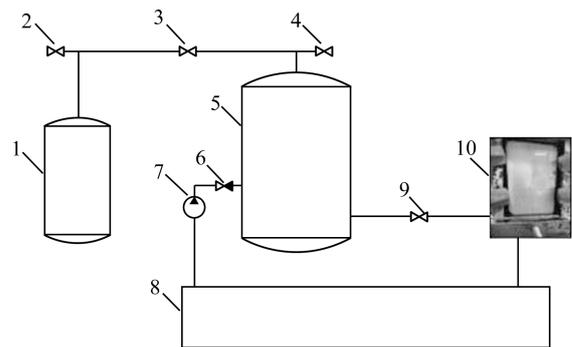
1 系统控制方案与硬件组成

1.1 系统控制方案

系统控制方案示意图如图 1 所示,整个系统以气罐和气液两相罐为核心,在管道上布置电磁阀维持系统工作,气液两相罐接入电动试压泵。

当电源接入系统时,压力传感器采集数据给 PLC,PLC 通过传输协议将数据传输给上位机平台,上位机平台反馈控制参数给 PLC,当气液两相罐压力值与设定值压力差距较大时,PLC 根据实际两罐压差决定 3 号电磁阀开闭时间,其他电磁阀关闭,压力补充至系统设定阈值,关闭 3 号电磁阀。根据实际压力值与设定目标值的差值,通过

模糊 PID 给出关于电动试压泵的控制信号,控制电动试压泵向气液两相罐内泵入液体,使气液两相罐内的压力精准达到设定值。当气液两相罐因液体损耗而压力下降时,模糊 PID 重新启动电动试压泵向气液两相罐内补入定量液体至目标压力值。



1—气罐;2,3,4—电磁阀;5—气液两相罐;6—单向阀;
7—试压泵;8—水箱;9—电磁阀;10—加载装置。

图 1 系统控制方案

Fig. 1 System control plan

通过上述控制方案可知,控制系统设计的主要目的是精准调控气液两相罐内的压力值。采用模糊 PID 控制策略^[9-12]控制变频器驱动试压泵电机向气液两相罐体内泵入液体,从而实现压力的精准调节。

1.2 系统硬件组成

系统硬件结构如图 2 所示,PLC 通过模拟量输入输出模块实时读取传感器数据,经 PLC 的内部运算得到检测数据值;PLC 利用输入输出端口控制外部的电磁阀、继电器、变频器等电气设备,实现系统的自动控制。上位机控制软件与 PLC 通过 S7 通信协议进行通信完成控制与数据传输,并在上位机软件上完成相关参数设置、数据存储、报表输出等功能。

1) PLC 选型

PLC 作为控制系统的核心部分,合适的 PLC 型号选择尤为关键,根据系统实际控制需求以及对控制器响应速度要求,选择西门子 S7-1200 系列作为本设计的首选,为了实现不同压力条件下泵入流量优化,PLC 需要足够的程序存储空间、代

码运行速度和开断响应时间,所以综合考虑西门子 S7-1217C DC/DC/DC 为控制器。CPU 1217C 具有 150 kB 工作存储器和 4 MB 装载存储器,并提供 16 kB 用于启动和循环程序、6 kB 用于中断处理的临时存储器,可以满足算法应用和检测数据存储要求。在每秒执行的指令数中,CPU 1217C 的基本数学和位运算速度为 $0.08 \mu\text{s}$ 、字运算速度为 $1.7 \mu\text{s}$,其指令运行速度可实现系统设备工作状态和运行参数的实时测量与处理。输入延时最大为 12.8 ms 输出延时最大为 $5 \mu\text{s}$,满足系统控制需求。

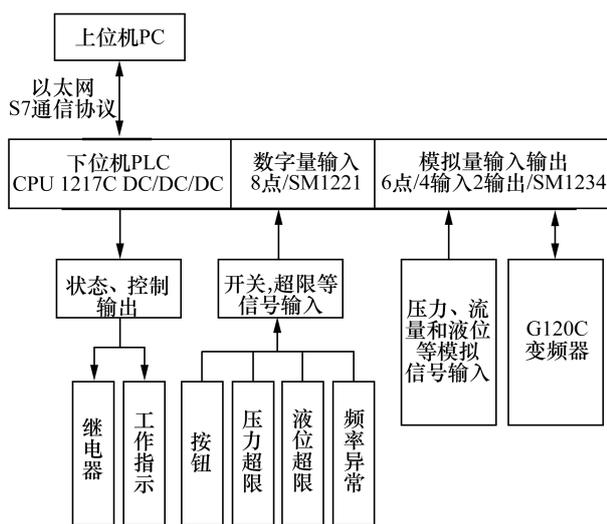


图 2 系统硬件结构

Fig. 2 System hardware structure

2) 传感器模块

本设计主要针对采集压力数据,因此只针对压力传感器选择做出说明。压力传感器选择 MIK-P 系列压力变送器,MIK-P 采用高精度、高稳定性压力敏感芯片作为信号测量元件,即通过在硅片上扩散四个高精度电阻,从而形成惠斯通电桥。由于压阻效应,四个桥臂电阻的阻值发生变化,电桥失衡,敏感元件从而输出一个对应压力变化的电信号。输出的电信号通过放大和矫正电路的补偿,将相应的信号转换为标准模拟信号。MIK-系列压力传感器抗干扰能力强、温度漂移低、稳定性高。本文选择的压力变送器的输出信号为 $4 \sim 20 \text{ mA}$,量程为 $0 \sim 30 \text{ MPa}$ 。

3) 高压电磁阀

现阶段系统设计的最高工作压力为 30 MPa ,为了确保设备和人身安全,考虑工作压力、控制形式、电气规格、管径与极端情况下的安全,采用工

作电压为 DC24V 的常闭电磁阀作为系统的一部分。当正常工作时,人为控制阀门的开闭;当系统过压时,PLC 内部模块控制泄压电磁阀工作进行主动泄压,同时设备状态报警,避免极端情况发生。

4) 继电器选择

由于系统的外围电气设备工作电压有 DC24V 与 AC220V 两种电压规格且 PLC 为 DC24V 供电。根据系统的输出与外围电气设备要求,并且保证 PLC 与外围电气设备安全,选用控制回路为 DC24V 的小型继电器,其具有反应灵敏,工作寿命长,耐受电压高,动作可靠等优点。同时配合其他外围电气设备使用,为系统的可靠性与安全性提供保障。

2 控制系统设计

2.1 PLC 控制软件

通过对控制系统的参数确定以及相关硬件的选择,采用西门子 TIA Portal V16 对 PLC 进行控制编程,TIA Portal V16 软件开发界面如图 3 所示。该软件支持 LAD (ladder diagram programming),FBD (function block diagram programming),SCL (structured control language programming) 等编程语言,方便高效减少了控制程序的开发时间。在本设计中控制程序功能分为如下几个模块:压力检测模块、控制模块、模糊 PID 模块、系统参数设置模块、数据传输模块等。其中为实现裂隙水压的快速、稳定补给,采用模糊 PID 算法配合变频器,调压电动试压泵的补液速率,实现精准控压。

2.2 PLC 控制程序

本控制系统的 PLC 程序采用 LAD 编程,小部分为 SCL 编程,包含主程序、循环中断程序、压力检测子程序等。基本流程如图 4 所示,系统控制分为上位机与按钮两种方式,选择按钮开关来控制系统阀门动作,主要为了防止上位机与 PLC 通信出现错误,系统无法控制设备时保障人员安全;选择上位机控制时,主程序循环调用数据计算、上位机控制和模糊 PID 控制模块。当压力低于设定值,调用模糊 PID 子程序控制变频器动作。对于上位机控制子程序,PLC 接受上位机的参数设定值与控制指令,参数在 PLC 内部运算,根据运算结果 PLC 发出控制指令,驱动电磁阀与变频器,做出正响应。

根据现有实际需求,本文只针对 $0 \sim 5 \text{ MPa}$ 压力范围进行控制,对于模糊 PID 子程序,以高压气体给压停止后气液两相罐设计压力值与系统设定

值之间的偏差 e 和偏差变化率 e_c 为输入。根据 e 和 e_c 的值查表,分别给出 PID 控制参数 K_p, K_i, K_d 的整定值 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 。利用整定的 PID 参数

$K_p = K_{p0} + \Delta K_p, K_i = K_{i0} + \Delta K_i, K_d = K_{d0} + \Delta K_d$ 控制变频器,调节试压泵泵入流量,从而实现精准调压至设定目标值。模糊 PID 子程序流程图如图 5 所示。

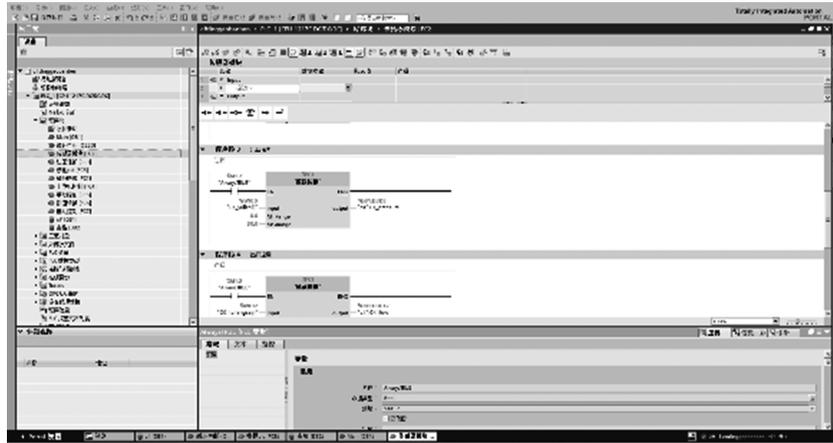


图 3 PLC 程序开发界面

Fig. 3 PLC program development interface

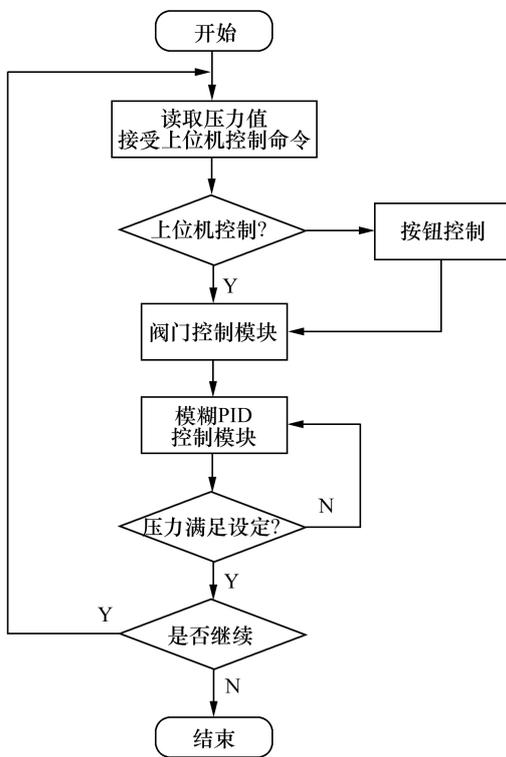


图 4 系统软件流程

Fig. 4 System software process

2.3 上位机软件

根据系统的实际需求,在 Visual Studio 2022 平台上使用 C# 语言开发上位机软件。Visual Studio 是目前流行的 Windows 平台应用程序的集成开发环境。上位机界面包括设备监控界面、设备控制界面、参数设置界面,其中监控界面包括当

前设备运行状态、实时参数显示等,实验操作人员可根据当前压力的显示值来判断当前液压值是否达到实验需求。上位机监控界面如图 6 所示。

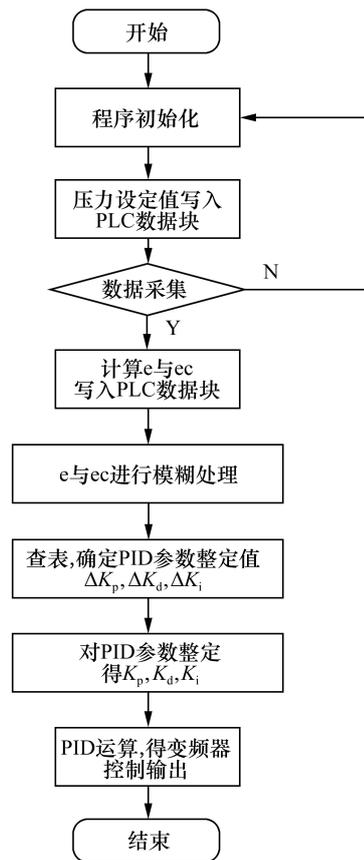


图 5 模糊 PID 子程序流程图

Fig. 5 Fuzzy PID subroutine flowchart

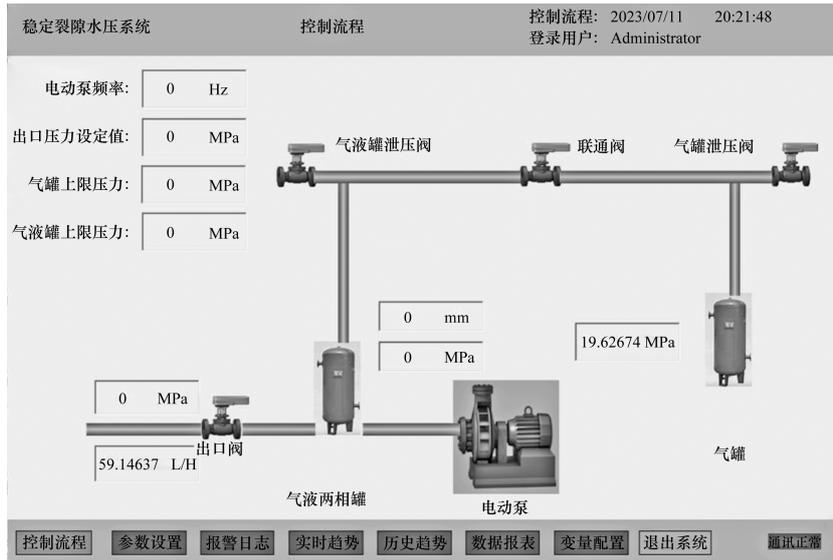


图 6 PC 界面

Fig. 6 PC interface

上位机与 PLC 采用西门子 S7 通信协议实现数据传输,所有西门子 S7 控制器都集成了用户可以读写数据的 S7 通信服务,S7 通信协议能够确保大量数据传输时处理器和总线保持低负荷状态。

为实现实时数据的存储和历史数据的读写,系统采用小型数据库 SQLite Studio-3 进行数据存储,实现登录账号存储、实时采集传输存储、数据报表输出等相关操作。

3 实验结果

利用自动控制系统进行性能测试,试验数据如表 1 所示。

表 1 压力控制试验数据

Table 1 Experimental data of pressure control

初始压力/ MPa	设定压力/ MPa	峰值压力/ MPa	所需时间/s
0.750	1.000	1.016	10.040
0.800	1.000	1.017	8.329
0.850	1.000	1.019	6.050
0.900	1.000	1.015	4.343
0.950	1.000	1.019	2.683
1.750	2.000	2.019	6.250
1.800	2.000	2.016	5.122
1.850	2.000	2.015	3.922
1.900	2.000	2.016	3.060

续表

初始压力/ MPa	设定压力/ MPa	峰值压力/ MPa	所需时间/s
1.950	2.000	2.018	1.900
2.750	3.000	3.013	4.343
2.800	3.000	3.014	3.438
2.850	3.000	3.016	2.957
2.900	3.000	3.016	2.150
2.950	3.000	3.016	1.186
3.750	4.000	4.021	3.367
3.800	4.000	4.019	2.875
3.850	4.000	4.019	2.183
3.900	4.000	4.020	1.586
3.950	4.000	4.020	0.971
4.750	5.000	5.015	2.650
4.800	5.000	5.016	2.300
4.850	5.000	5.016	1.614
4.900	5.000	5.015	1.413
4.950	5.000	5.015	0.833

从表 1 的测试数据可知,对压力设定值进行不同范围启动电动试压泵进行精准调压控制测试,压力能够很快达到目标值,并且峰值压力波动范围维持在一定范围内。

系统的控制结果与系统的硬件配置有关,如果系统的硬件配置发生改变,相关的参数需要重新设计与调节。

4 结 论

针对稳定水压供给试验系统的基于高压气体加压装置的精准供压需要,设计了一种以西门子PLC为核心控制器,利用C#语言设计和开发一种具有设备状态监测,设备控制,过压保护,数据存储等功能的自动控制系统。与原有装置相比本系统具有以下优势:

1)基于高压气体给定的初始压力,增压至设定目标值,上压速度快,再由试压泵向气液两相罐内泵入液体上进行精准调压。可以显著提高供压效率与供压精准度,减少高压气体损耗。

2)精准压力供给控制方式采用模糊PID控制,降低峰值压力波动,对压力调节效率和调节效果提升明显。

3)系统通过自动控制减少人工辅助步骤与强度,并且整个装置测试精度提升为0.001 MPa。

参考文献:

- [1] 周志华,曹平,叶洲元,等.单轴循环载荷与渗透水压下预应力裂隙岩石破坏试验研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(2):292-298.
- [2] 曹加兴,朱珍德,田源,等.水压作用下三维裂隙组扩展过程试验研究[J].科学技术与工程,2017,17(4):92-98.
- [3] 付金伟,朱维申,张新中,等.内水压下含中空裂隙新

型材料的压裂试验及数值模拟研究[J].工程科学与技术,2017,49(4):78.

- [4] 董振兴,李勇,朱维申,等.水压作用含贯穿裂隙类岩石试件力学性能研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(1):64-72.
- [5] 曾佳君.稳定渗透水压作用下裂隙岩体断裂破坏机制研究[D].衡阳:南华大学,2021:75-102.
- [6] 李林,史雅军,宋斌,等.基于PLC的高压气瓶检测系统设计与开发[J].国外电子测量技术,2021,40(2):98-101.
- [7] 刘行行,刘复玉,李林.基于PLC的液压控制系统在工业计量中的研究与应用[J].国外电子测量技术,2018,37(8):34-38.
- [8] 卢进南,单德兴,谢苗,等.高精度双稳水流量试验器控制方法及实验[J].控制工程,2020,27(10):1760-1767.
- [9] MICCIO M, COSENZA B. Control of a distillation column by type-2 and type-1 fuzzy logic PID controllers[J]. Journal of process control, 2014, 24(5):475-484.
- [10] 陈川,唐岚.基于PLC的带式输送机模糊PID控制系统[J].煤矿机械,2020,41(11):174-177.
- [11] 江翠翠,王佐勋.模糊-PID控制在气密性检测压力控制系统中的应用[J].齐鲁工业大学学报,2021,35(3):52-58.
- [12] 郝文彬,冯天玉,黄世明,等.基于模糊PID控制的烘干房温度控制设计[J].中国农机化学报,2021,42(12):101-106.