

# 脉冲萃取柱专用智能控制器研究

关雅琳<sup>1,2</sup>, 陈悦源<sup>1,2</sup>, 安晓松<sup>1,2</sup>, 李海丽<sup>1,2</sup>, 林俊杰<sup>1,2</sup>

(1. 中国核电工程有限公司, 北京 100840; 2. 中核核燃料后处理工程技术研究中心, 北京 100840)

**摘要:**脉冲萃取柱是核燃料后处理厂中的关键设备,其运行情况关系萃取的效果以及全厂的安全,监测脉冲萃取柱的运行情况至关重要。该文设计研究智能脉冲萃取柱专用控制器,搭建专属于脉冲萃取柱的独立控制器,控制器具有独立计算、存储等功能,能够实时监测脉冲萃取柱的运行情况,搭载自适应模糊 PID 控制方法,能够自适应调节控制萃取柱界面,并具有故障诊断、远程控制等功能,能够为脉冲萃取柱提供更全面的测控需求,提升了脉冲萃取柱的运行效率并为其安全平稳运行提供支持。

**关键词:**智能控制器;脉冲萃取柱;界面控制;实时监测

中图分类号:TL24

文章编号:1000-0682(2024)04-0022-05

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.04.005

## Research of special intelligent controller for pulse extraction column

GUAN Yalin<sup>1,2</sup>, CHEN Yueyuan<sup>1,2</sup>, AN Xiaosong<sup>1,2</sup>, LI Haili<sup>1,2</sup>, LIN Junjie<sup>1,2</sup>

(1. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China;

2. CNNC Engineering Research Center for Fuel Reprocessing, Beijing 100840, China)

**Abstract:** Pulse extraction column is the key equipment in nuclear fuel reprocessing plant. Its operation is related to the extraction effect and the safety of the whole plant. Monitoring the operation of the pulse extraction column is crucial. In this paper, a special intelligent controller for pulse extraction column is designed and studied, and an independent controller dedicated to pulse extraction column is built. The controller has functions such as independent calculation and storage. It can monitor the operation of pulse extraction column in real time. The controller is equipped with adaptive fuzzy PID control method, which can adjust and control the extraction column interface adaptively. And the controller has fault diagnosis, remote control and other functions. It can provide more comprehensive measurement and control requirements for the pulse extraction column, improve the operation efficiency of the pulse extraction column and provide support for its safe and stable operation.

**Keywords:** intelligent controller; pulse extraction column; interface control; real-time monitoring

## 0 引言

脉冲萃取柱是核燃料后处理厂中的核心设备,用于萃取分离高放废液中的放射性物质,具有占地面积小、传质性能好、处理通量大等优点,在湿法工艺流程中起着重要作用<sup>[1-2]</sup>。脉冲萃取柱柱内的料液具有强放射性,其运行情况影响着产品产出质量,

其运行安全也关系全厂安全,对脉冲萃取柱的运行状况检测控制是保证其安全稳定运行必不可少的环节<sup>[3]</sup>。

随着近代计算机、电子技术的发展应用,集成了自动控制、微电子、通讯以及传感等技术的智能控制器应运而生,智能控制器具有计算、存储、自动化、通信、逻辑判断等功能,软硬件相结合<sup>[4]</sup>,能够实现复杂控制方法以及检测策略,具有可靠性高、性能好、可远程操控、智能化等特点<sup>[5-6]</sup>。专用智能控制器可为设备提供专一、定制化的监控方案,分散 DCS 的计算负荷,形成专用的检测控制系统。

收稿日期:2024-02-23

第一作者:关雅琳(1997—),女,汉族,河北邢台人,硕士,助理工程师,研究方向为后处理厂检测控制研究。

E-mail: gyalin@163.com

该文设计研究专用于脉冲萃取柱的智能控制器,优化控制方法提升测量精度,并提供多元化测控服务。控制器搭载高性能硬件平台以及充足的存储空间,以满足数据运算量需求,提供精细化的检测方案,实时监测萃取柱运行参数,完整记录萃取柱柱内料液运行变化,制定合适的控制方法,实现对萃取柱界面的自适应控制,能够跟随萃取柱的实际工况自动调节控制界面情况,且控制器具有通信、故障诊断功能,不仅可实现就地显示与控制,还可满足远程控制,通过历史数据分析预警萃取柱及控制系统的故障情况。专用智能控制器能够对脉冲萃取柱的工况进行更为完备的监测,为操作员提供可靠、准确的萃取柱运行情况。通过此智能控制器对萃取柱的良好控制,既可提高萃取柱的运行效率,也可保证其运行安全,避免现场 DCS 单独模块调试,形成完备的成套控制系统。

## 1 脉冲萃取柱监控过程

脉冲萃取柱整体组成结构简单,由上扩大段、柱体以及下扩大段构成<sup>[7]</sup>。脉冲萃取柱简图如图 1 所示,柱内一般充入水相和有机相两种密度不同的液体,水相由上进料口进入,有机相由下进料口进入,通过两相逆流密切接触,完成放射性物质的萃取置换。脉冲用于向萃取柱提供能量,增加两相液体的接触面积,提高传质效率<sup>[8-9]</sup>。物料进出的流量以及脉冲频率、强度等均可自由控制。

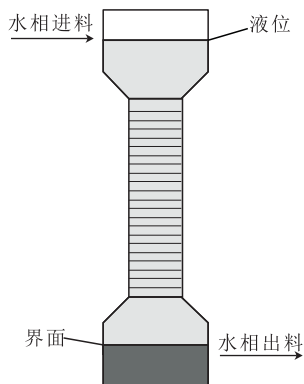


图 1 脉冲萃取柱简图

脉冲萃取柱运行时,通常需要监测柱体的温度、液位、界面、密度、柱重等参数,针对脉冲萃取柱的高放环境,温度测量选用铠装热电偶,液位等参数测量采用吹气法测量<sup>[10]</sup>。萃取柱柱内由于脉冲的注入,液体反应剧烈,参数变化迅速,控制系统需设置较高的采样频率采集各仪表的检测参数,并配置严谨的检测方案,才能够准确监控脉冲萃取柱的运行情况。

萃取柱运行过程中,界面的高度控制至关重要,既影响产出质量也关系运行安全,由于料液的强放射性,萃取柱下扩大端水相出料处由空气提升系统调节<sup>[11]</sup>,界面控制存在非线性、滞后严重等特性,目前 DCS 控制系统采用简单控制方法,效果不佳,自动调节的结果不理想。

## 2 控制器设计

### 2.1 控制器硬件设计

专用智能控制器是面向脉冲萃取柱独立的测控需求而开发的控制器,是萃取柱智能控制的核心,具有系统总线接口<sup>[12]</sup>,能够进行信息的采集以及指令的下发,具有大容量的存储空间,可以满足复杂系统运行的要求,内含高性能的处理器,具有强大的数据处理能力,能够支持复杂的算法,以及大量数据的运算处理,可实现独立制定的控制方法,支持硬点接线和数字通讯。控制器硬件组成如图 2 所示,主要包括微控制器,IO 模块,人机交互模块,电源模块,通信模块几个部分。

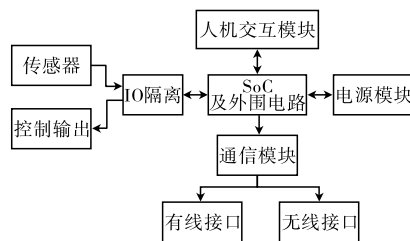


图 2 控制器硬件组成

控制器以高性能 SoC 为核心,具有强大的运算能力,快速的数据处理速度,大存储容量,低功耗,良好的扩展性以及较高的集成度,可靠性以及稳定性好。

电源模块作为提供能源的模块,是控制器不可或缺的部分,电源模块能够为控制器的运行提供 DC0.8 V、1.5 V、3.3 V、5 V、12 V 及 24 V 供电,空载功耗低,转换效率高,纹波良好,散热性能优异,防雨防雷稳定安全。

控制器含有丰富的 IO 接口,用于数据和命令的接收和下发,支持多路输入输出,用于满足兼容和扩展性。控制器通过 IO 模块将传感器采集的数据转换并通过内部总线传送至处理器,可记录、运算、存储接收的数据,并输出控制结果,转换为外部总线信号,将指令下放至设备,控制萃取柱执行机构和脉冲装置。

控制器包含人机交互模块,采用 1920 × 1080 分辨率,在不大量增加运算负担的情况下仍能在主界

面完全显示萃取柱运行主要参数。采用 1U 尺寸键盘配合触控屏保证查看下级菜单的便捷性和修改参数的高效性,同时保证三防设计、防静电以及屏蔽壳(层)和声光报警器,能够就地实时监控萃取柱工况、运行参数、报警情况,且可查看修改脉冲装置的频率、强度以及控制萃取柱出料流量。

控制器对外通讯接口丰富,满足兼容性设计,支持以太网,RS232 及 RS485 接口,支持 MODBUS/TCP 通讯协议,亦可通过无线 TCP 或 UDP 传送数据包。支持修改自定义帧头帧尾以适应现场协议,实现与上位机或控制中心的通信,实现远程控制需求。

## 2.2 控制器软件设计

### 2.2.1 总体方案

控制器的软件完成自动控制调节的实现、数据的加工处理、监控、通信以及显示功能,各软件模块间耦合小,可单独对某个功能模块修改编辑或剔除,软件的可维护性高。控制器软件总体方案如图 3 所示。

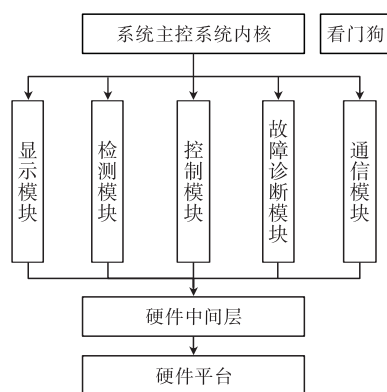


图3 控制器软件总体方案

### 2.2.2 检测方案

脉冲萃取柱检测参数中,除温度可通过温度检测仪表测量外,其余参数均通过吹气法测量得到,吹气仪表根据插入被测介质中仪表管不同的插入深度,获得差压值,再经静压公式换算,结合仪表管的插入深度运算得出最终参数值<sup>[13]</sup>。液位测量时,需有一根仪表管插入空气中,一根插入液相,通过两管间的差压值以及插入液相的深度,带入液位计算公式,即可得出液位高度值  $H_L$ :

$$H_L = \frac{P_L}{\rho g} + H \quad (1)$$

式中: $P_L$ 为液位差压变送器测得的两管间压差; $\rho$ 为液体密度; $H_2$ 为插入液相仪表管的高度; $g$ 为重力加速度。

界面的测量需将一根插入有机相,一根插入水相,根据不同相中的两管差压值,再带入界面计算公

式,即可得出界面值  $H_{LW}$ :

$$H_{LW} = \frac{P_{LW} - \rho_1 g (H_1 - H_2)}{g(\rho_2 - \rho_1)} + H_2 \quad (2)$$

式中: $\rho_1$ 为有机相密度; $\rho_2$ 为水相密度; $H_1$ 与  $H_2$ 分别为两根仪表管下管口的高度。

密度测量时,需将两根仪表管均插入同一介质中,此时根据两管的差压以及高度差,即可换算成相应密度值  $\rho_D$ :

$$\rho_D = \frac{P_D}{(h_2 - h_1)g} \quad (3)$$

式中: $P_D$ 为密度差压变送器测得差压值; $h_2 - h_1$ 为两仪表管插入高度差。

通常脉冲萃取柱有两种工况,水相连续与有机相连续,有机相连续时,界面位于萃取柱的下扩大段,液位稳定于上扩大段溢流口出,为检测萃取柱的准确参数,需在上扩大段插入 2 根吹气仪表管,下扩大段插入 4 根吹气仪表管。水相连续时,界面与液位均处于上扩大段,在上扩大段插入 5 根仪表管,下扩大段插入 2 根,共同实现对液位、界面、密度、柱重等参数的测量。



图4 检测判断方案

吹气仪表中的差压变送器连接不同插入深度的两管,测量出其两管间的差压值,再将测量值实时上传至控制器,控制器接收到多个差压值,分别对其进行判断和运算。对于密度参数,需根据差压值判断两管是否处于同相中,再带入相应公式进行计算。检测判断方案图如图 4 所示,针对液位和界面,首先需要比较不同管间的差压值,对于界面还需结合柱内实测密度值,从而判断液位或界面的所处位置,根据位置所处的不同情况,带入不同的计算公式中进行运算,得出实时液位值和界面值。

### 2.2.3 控制方法

界面高度是萃取柱运行测量的重要参数,萃取柱界面的控制采用自动调节方式,在控制回路中,界面为控制对象,界面高度通过吹气法获得,界面的高低通过控制萃取柱下扩大段出口流量实现,目前界面控制为常规单回路负反馈控制,采用传统 PID 控制,界面控制框图如图 5 所示。

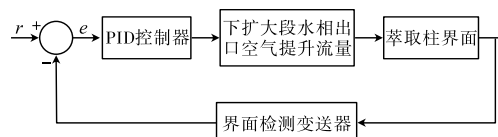


图5 单反馈界面控制框图



够自由地与上位机、下位机进行通信,控制器采集的数据、状态信息可实时上传至上位机,并接收上位机下发的控制命令,实现远程控制。

### 2.2.6 交互模块

控制器既可接受远程控制,也可进行就地操作,方便现场人员调试操作,并通过用户授权码形式防止误操作。人员就地交互时,可手动控制运行状态或覆盖参数。控制器的交互模块采用显示屏、触摸屏和键盘相结合的方式,主界面显示主要参数及关键状态更改按钮,分支界面设置多个不同主题内容页面,可根据需要自由切换,显示实时测量数据、调取测量仪表历史数据、通过界面向控制器发送控制命令,更改脉冲频率等内容。

## 3 总结

该文针对脉冲萃取柱的检测控制需求,设计研究了专用于脉冲萃取柱单个设备测控的专用智能控制器。控制器具有大存储、多接口、高性能的硬件设施,提供数据采集、运算、控制硬件基础,具有优化的测量与控制算法,实现对脉冲萃取柱运行工况的良好监控,带有故障诊断技术,能够发现预警控制系统的故障问题,支持就地和远程控制,根据用户需求可自动切换。脉冲萃取柱专用智能控制器能够为萃取柱的运行提供更为全面的服务,满足检测与控制的复杂需求,为萃取柱的可靠运行提供保障。

### 参考文献:

- [1] 陈飞越. 脉冲折流板萃取柱的放大规律研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2023.
- [2] 高明媛,边伟. 后处理厂钪纯化工艺过程萃取设备的

- 选取[J]. 广东化工, 2022, 49 (08): 185 - 186 + 205.
- [3] 陈靖,徐世平,吴秋林,等. 吹气法在线测量脉冲萃取柱参数研究[J]. 原子能科学技术, 2001 (S1): 34 - 40.
- [4] 周橧颜. 基于嵌入式软 PLC 技术的智能控制器设计策略[J]. 信息记录材料, 2021, 22 (12): 141 - 142.
- [5] 黄森. 基于 FPGA 的智能控制器的设计与实现[D]. 上海:东华大学, 2010.
- [6] 杨建波,姚晶星,王方平,等. 智能控制器在水泥生料在线配料中的应用[J]. 仪表技术, 2023 (01): 6 - 9.
- [7] 曹鑫,侯媛媛,刘继连,等. 乏燃料湿法后处理中脉冲萃取柱的设计选型[J]. 产业与科技论坛, 2020, 19 (03): 43 - 45.
- [8] 侯彦龙,谭博仁,魏刚,等. 工业级脉冲折流板萃取柱 CFD 模拟研究[J]. 原子能科学技术, 2021, 55 (S2): 310 - 317.
- [9] 赵治锦. 共去污分离循环脉冲萃取柱的动态特性及数学模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2021.
- [10] 冯存强,刘宇,李晓薇,等. 一体化吹气仪表的研发与应用[J]. 化工自动化及仪表, 2023, 50 (04): 477 - 485 + 580.
- [11] 张博,冯存强,刘晓莉. 脉冲萃取柱界面控制方法研究[J]. 化工自动化及仪表, 2021, 48 (03): 212 - 215.
- [12] 石刚,井元伟,徐皑冬,等. 工程机械智能化控制系统的研究[J]. 仪器仪表学报, 2006 (S3): 1931 - 1933 + 1936.
- [13] 刘振青,安超,姚仲坤. 吹气法测液位在海上石油平台的应用[J]. 设备管理与维修, 2023 (18): 149 - 151.

# 欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎刊登广告!

国内邮发代号:52-49 国际发行代号:BM529 定价:18.00 元/期 108.00 元/年  
地址:西安市高新区沣惠南路 8 号 邮编:710075 电话:029-81871277  
网址: <http://yb-zdh.shaangu-group.com> 电子邮箱: [gyybbjb@126.com](mailto:gyybbjb@126.com)