

矿井水井下利用与抽排协同控制系统设计

张耀明^{1,2,3,4}, 李 标^{1,2,3,4}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室, 北京 100013; 3. 煤矿应急避险技术装备工程研究中心, 北京 100013; 4. 北京市煤矿安全工程技术研究中心, 北京 100013)

摘要: 针对传统矿井水地面集中处理模式运行成本高、处理能力有限等问题, 提出了一种基于智能控制的矿井水井下就地利用与抽排方案。该方案针对悬浮物含量高、矿化度低矿井水, 采用“多级沉淀-超磁分离-反冲洗过滤”组合工艺进行高效净化, 使出水水质满足井下消防与除尘用水标准, 实现了矿井水井下循环利用。系统以 PLC 控制系统为核心, 构建水质监测网络, 并创新性地设计了供水、排水与应急三种模式的动态切换逻辑, 采用 PID 控制算法实时调节水泵转速, 实现了恒压供水, 有效保障了系统稳定高效运行。该方案为煤矿井下水资源的高效可持续利用提供了有效的技术路径。

关键词: 煤矿矿井水; 协同控制; 处理技术; 超磁分离

中图分类号: TD672

文章编号: 1000-0682(2026)02-0024-05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.02.005

Design of coordinated control system for underground utilization and drainage of mine water

ZHANG Yaoming^{1,2,3,4}, LI Biao^{1,2,3,4}

(1. Coal Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, Beijing 100013, China; 3. Engineering Research Center for Technology Equipment of Emergency Refuge in Coal Mine, Beijing 100013, China; 4. Beijing Engineering and Research Center of Coal Mine Safe, Beijing 100013, China)

Abstract: In response to the issues of high operational costs and limited treatment capacity associated with the traditional centralized surface treatment model for mine water, this paper proposes an intelligent control-based scheme for the on-site utilization and drainage of mine water underground. Targeting mine water characterized by high suspended solids content and low mineralization, the scheme employs a combined process of "multi-stage sedimentation-super magnetic separation-backwash filtration" for efficient purification. This ensures the effluent quality meets the standards required for underground fire-fighting and dust suppression, thereby achieving the recycling of mine water within the mine. With a PLC-based control system at its core, a water quality monitoring network is established. Innovatively, the system incorporates a dynamic switching logic between three operational modes: water supply, drainage, and emergency. By utilizing a PID control algorithm to regulate pump speed in real-time, constant-pressure water supply is achieved, effectively ensuring the system's stable and efficient operation. This scheme provides an effective technical pathway for the efficient and sustainable utilization of water resources in coal mines.

Keywords: coal mine water; coordinated control; treatment technology; super magnetic separation

收稿日期: 2025-10-10

第一作者: 张耀明(1984—), 男, 辽宁铁岭人, 本科, 工程师, 研究方向为矿山智能化与自动化。

0 引言

矿井水是煤炭开采过程中伴生的重要水资源, 其高效处理与回用已成为绿色矿山建设的关键环

节^[1]。据统计,我国煤矿年涌水量超过 80 亿立方米,受矿井条件复杂、处理成本高、技术成熟度不足等因素制约,总体利用率偏低,且存在较大地区差异^[2],2024 年,国家发展改革委等部门印发《关于加强矿井水保护和利用的指导意见》,特别强调了“分质分级”利用的重要性,推进矿井水分质分级处理,对含悬浮物矿井水进行井下处理后再利用,是减少水资源浪费和能源消耗,缓解地面水处理压力,提高经济效益的有效途径^[3-4]。

对于悬浮物含量高、溶解性固体少、矿化度低的矿井水,通过适当的物理处理即可满足井下消防、除尘等使用要求。这样既可以减少生产用水补充量,又能降低地面水处理成本和地下水资源消耗^[5]。因此,开发高效、自动化程度高的井下水利利用与智能抽排系统具有重要的现实意义^[6-7]。该文设计了一套基于可编程控制器(PLC)的井下矿井水利利用与抽排的智能控制系统,采用多级沉淀、超磁分离、反冲洗过滤等工艺,结合实时水质监测和智能控制算法,实现了矿井水井下回用、智能抽排与应急响应,旨在降低地面处理负荷,提高水资源利用率^[8-9]。

1 总体设计

该文以山西省某煤矿井下供排水系统为研究对象,结合矿井水水质和用水需求特点,提出了“井下处理、智能回用、应急抽排”的整体技术方案,该方案旨在实现矿井水的高效沉淀与悬浮物去除,并确保净化后的矿井水回用于消防和除尘系统,同时与强排系统实现应急排水。

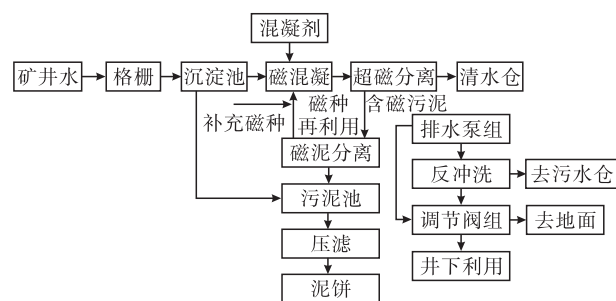


图1 工艺流程图

系统工艺流程如图1所示。矿井水经格栅除去大尺寸漂浮物;通过沉淀仓除去大颗粒悬浮物;在混凝池中投加混凝剂与磁种进行充分混合,形成絮凝体,利用磁分离设备实现矿井水与絮凝体分离;含磁污泥进入磁泥分离设备回收磁种,回收后的磁种回

用,剩余的污泥与预沉淀仓的沉淀物一并进入污泥池,经压滤机脱水后形成泥饼外运;超磁分离处理后的矿井水进入清水仓,经排水泵组再通过反冲洗过滤器进一步净化后,根据控制逻辑分配至消防、除尘系统,或输送至地面水厂^[2]。

2 硬件设计

2.1 超磁分离系统

我国大部分煤矿矿井水中均含有悬浮物,主要以煤粉和岩粉为主,在流动过程中呈悬浮状态,颗粒物直径以 50 μm 以下为主,约占悬浮物的 88%^[2]。超磁分离工艺对矿井水中悬浮物处理具有分离效率高、占地空间小、出水水质稳定、处理成本合理等优点,结合矿方实际情况选择此工艺对矿井水中的悬浮物进行处理。该设计根据处理水量 200 m^3/h 进行设备选型,主要设备包括沉淀仓、混凝池、污泥池、超磁分离设备、磁泥分离设备及压滤机。

2.2 反冲洗过滤设备

该装置具有自动运行、水质适应能力强、节能节水等优点。当进出口的压差达到设定值时,依次对过滤器逐个进行反冲洗,反作用力将滤芯内侧污物冲掉并通过排污口排出,反冲洗流程结束后,排污阀自动关闭。该设计根据处理水量 200 m^3/h ,过滤精度 40 μm 进行设备选型,设备运行状态通过 Modbus 协议传输至控制系统,实现远程智能管控。

2.3 排水泵组及阀门

排水泵采用多级离心泵,额定流量 200 m^3/h ,扬程 420 m,配套电机功率 400 kW。在沉淀仓设置一台强排泵,额定流量 200 m^3/h ,扬程 420 m,配套电机功率 450 kW,用于异常情况的紧急排水,主要设备选型见表1。阀门采用一体式电动阀,并具备 RS485 通讯功能,便于自动化控制。

表1 排水泵组主要设备参数

名称	型号	数量	备注
多级离心泵	MD200-60*7	2	一用一备
离心泵电机	YKK500-4	2	变频调速
强排泵	BQS200-420-300/N	1	
矿用电动闸阀	Z941H-64C	6	DN200,PN6.4 MPa

泵组设备布置图如图2所示。反冲洗过滤器前设置电动闸阀 XV-3 和 XV-4,当反冲洗过滤器出现故障时自动切换旁路运行。电动闸阀 XV-5、XV-6、XV-7 用于系统运行模式切换。

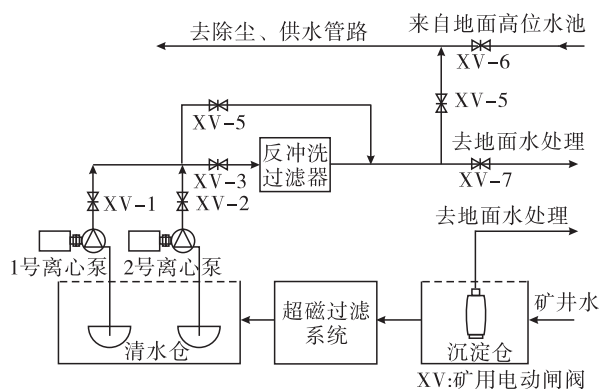


图 2 泵组设备布置图

2.4 控制系统

系统以西门子 S7 - 1200 系列 PLC 为控制核心,采用 PLC 控制柜加分布式控制分站的形式,减少布线成本和施工时间,提高系统可靠性。控制系统采用三层架构,如图 3 所示。

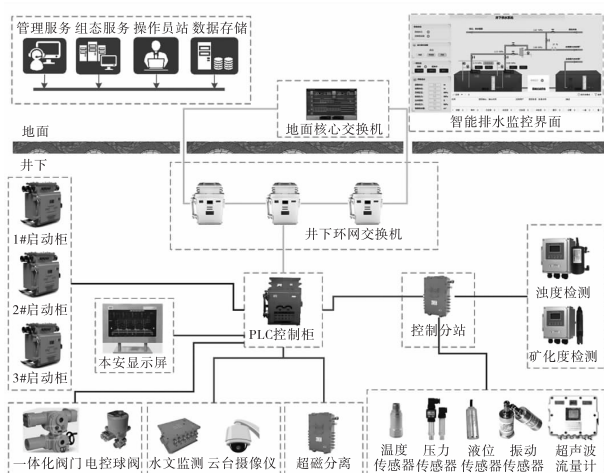


图 3 控制系统拓扑图

上位机层:采用服务器 + 组态软件架构,实现系统的集中控制和状态显示。为操作人员提供了良好的人机交互界面,具备报警、曲线、报表、日志等功能。历史数据库为分析设备运行状态、追溯故障原因提供了数据支撑。在安全性方面,提供了权限管理功能,关键数据的加密存储,还提供 Modbus、OPC、WebAPI 等通讯协议,方便与第三方系统的集成互联。

PLC 控制层:PLC 控制柜负责与超磁分离系统、水文监测、控制分站、本安显示屏、云台摄像机等设备通信,实现对超磁分离系统、离心泵、强排泵、电动阀门等设备的控制。数据通过 PLC 自带的 Profinet 以太网接口传输至井下环网,实现了数据上传与共享。

现场设备层:执行机构包括电动调节阀、电动闸

阀、电动球阀、电机控制柜等;感知设备包含压力、温度、振动、液位、流量、水质等传感器;视频数据结合 AI 分析模型,可以实现对现场人员及设备的状态监测。

3 软件设计

3.1 控制模式

系统提供自动、手动、检修 3 种控制模式,可以通过控制柜旋钮开关和上位机界面进行选择。同时,设计了 3 种运行模式,根据现场工况自动切换。

(1) 供水模式:当超磁分离系统、反冲洗过滤系统、排水泵组自检正常,且水质检测达标时,系统进入供水模式,控制流程如图 4 所示。

(2) 排水模式:当检测到井下超磁分离系统故障、反冲洗过滤系统故障或水质不达标时,系统进入排水模式,自动停止超磁供水系统,关闭阀 XV - 5 和阀 XV - 3,打开阀 XV - 4、阀 XV - 6 和阀 XV - 7,根据清水仓液位启动排水泵组,将矿井水排至地面水处理厂,消防和除尘系统用于来自地面供水。

(3) 应急模式:当供水模式故障、排水模式故障、或者沉淀水仓水位超过高水位时,系统进入应急模式,此时强排泵根据设定的沉淀仓水位阈值进行启停。与矿井灾害防治预警系统联动,当接收到“涌水预警”时,排水泵组和强排泵同时工作,使沉淀仓和清水仓处于低水位运行。

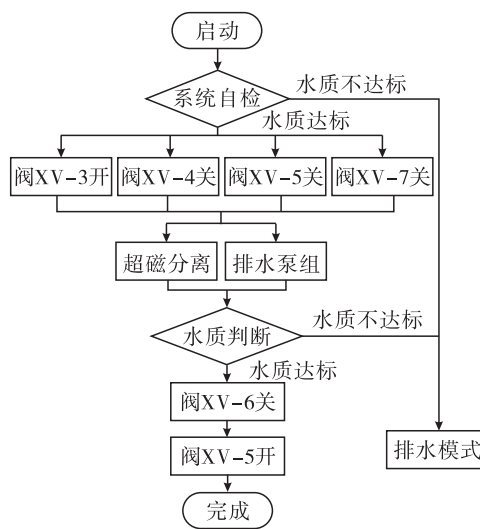


图 4 供水模式控制流程图

3.2 程序架构

采用模块化编程方式,主程序对子程序模块调用,子程序模块包括输入模块、输出模块、通讯模块、中断模块、手动模块、自动模块、连锁模块和报警模块。

自动模块:根据实时水质监测数据和设备运行状态,动态决策系统运行模式,应急模式优先级最高。建立基于模糊综合评判的水质评价模型,考虑浊度、pH值、悬浮物浓度等多个指标,输出水质等级(合格、不合格)。非供水模式时,系统自动切换到地面供水,关闭阀 XV-5,打开阀 XV-6。

一键启停功能:调度中心操作人员通过上位机实现远程一键启停。PLC 首先判断启动条件,当启动条件满足时,备妥指示灯变绿,操作人员可以点击一键启动按钮开始启动流程,流程如图 5 所示。

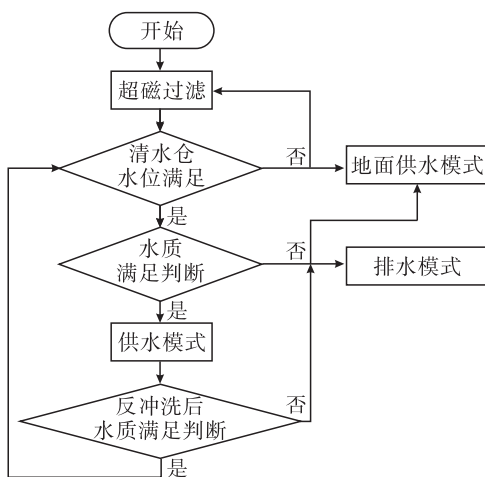


图5 一键启动流程图

3.3 系统保护及故障处理

系统具备完善的保护连锁及报警功能,主要连锁保护如下:

(1) 污水仓水位:设置 4 级水位报警,低水位/高水位报警;当水位下降至低低水位时,超磁分离系统将保护性停机并发出低低水位报警;当水位上升至高高水位时,系统发出高高水位报警并进入应急模式,强排泵运行直至水位低于高水位。

(2) 超磁分离系统:当超磁分离系统报警停机时,系统发出报警。

(3) 清水仓水位:设置 4 级水位报警,低水位/高水位报警;当水位下降至低低水位时,排水系统保护停机并发出低低水位报警,切换到地面供水;当水位上升至高高水位时,系统发出高高水位报警,超磁分离系统保护停机。

(4) 排水泵组:当运行泵组故障停机时,自动切换到备用泵组运行,系统报警提示运行泵组停机;当主备泵组都无法运行时,超磁分离系统保护停机,并进行报警。

(5) 反冲洗过滤系统:当反冲洗系统故障时,保护性切换至旁路运行(阀 XV-4 打开、阀 XV-3 关

闭),系统由供水模式自动切换到排水模式。

3.4 PID 控制

根据 GB 50383—2016《煤矿井下消防、洒水设计规范》中的要求,井下消防管道中,任何一点的压力不应低于 0.4 MPa,考虑 25% 压力损失及泵出口压力与电机转速平方成正比,设定变频调速范围为 18 Hz ~ 50 Hz。

为保障供水压力的稳定,系统采用基于 PID 算法的变频调速控制,输出公式如下:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

式中: $u(t)$ 为控制器输出; $e(t)$ 为压力偏差(设定值 - 反馈值); K_p, K_i, K_d 为比例、积分、微分系数。

该压力控制闭环的响应时间主要取决于变频器调节速度、电机 - 水泵机组的机械惯性以及管网流体动力学特性。该系统将变频器的加减速时间设置为 15 s,通过优化 PID 参数,使系统发生扰动后的 20 s 内,压力重新稳定于设定值的 ± 0.1 MPa 范围内,该 PID 算法被嵌入 PLC 程序中,当系统处于供水模式时自动投入,有效提升了系统的动态响应速度与运行稳定性^[10]。

3.5 上位机软件设计

上位机主要功能包括:

(1) 智能控制:对设备进行远程集中控制,实现自动切换、保护连锁、一键启停等功能。

(2) 数据采集:进行设备数据采集与存储,同时与第三方平台交互,实现数据共享。

(3) 画面显示:通过组态画面能够直观显示系统运行状态,提供工艺动画、设备运行状态、运行参数、统计报表、趋势曲线、报警信息等。

(4) 报警处理:记录归档开关量报警和模拟量报警,支持按条件查看对应报警事件。

(5) 系统安全:对每个操作账号设置使用权限,规定各操作动作的权限要求,防止越权操作。

4 应用效果

该设计方案已于山西省某年产 300 万吨的煤矿完成部署并投入运行。经过为期 6 个月的连续监测,系统在矿井水处理效率、出水水质稳定性以及节能降耗方面均表现出显著优势。

(1) 处理规模与循环利用率:该系统设计处理能力为 200 m³/h。在实际运行中,日均处理矿井水量达 2400 m³,高峰时段处理量稳定在设计值附近。其中,平均 1500 m³/d 的净化水被直接回用于井下

消防、降尘等环节,井下循环利用率达到 62.5%,极大地减少了新水的取用量。

(2)水质稳定性:系统对矿井水中悬浮物的处理效果尤为突出。进水悬浮物浓度在 150 ~ 450 mg/L 范围内波动,经处理后,出水悬浮物浓度稳定在 10 mg/L 以下,平均值低于 5 mg/L,远优于规范所要求的用水标准。

(3)节能效益分析:该效益主要源于井下就地处理与回用,避免了将大量矿井水提升至地面所消耗的势能。

$$E = \frac{Q * H}{367 * \eta_{\text{pump}} * \eta_{\text{motor}}}$$

式中: E 为日节约电量; Q 为流量; H 为扬程; T 为每日平均运行小时数;367 为换算常数; η_{pump} 为水泵效率; η_{motor} 为电机效率。

以系统给井下供水 1500 m³,扬程 300 m, η_{pump} 为 75%, η_{motor} 为 93% 计算,日节约电量为 1758 kWh,以年生产 330 天计算,年节约用电 588 117 kWh,减少地面水处理量 49.5 万吨。

5 结语

该文设计了一种基于 PLC 的井下矿井水利用与智能抽排控制系统,该系统针对含悬浮物浓度高、低矿化度的矿井水,采用“多级沉淀-超磁分离-反冲洗过滤”工艺,并通过智能控制算法实现了供水、排水、应急三种运行模式的秒级自动切换,显著提高了系统可靠性和应急响应能力。出水水质稳定

满足井下消防和除尘用水标准,降低了能耗和运行成本。未来研究将进一步优化模糊评价模型,结合机器学习算法提升预测精度。同时在实际应用矿井中开展长期监测,验证系统稳定性、适应性和长期效益,为煤矿的智能化建设与绿色发展提供更可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] 王东升. 煤矿矿井水处理技术应用现状及前景分析[J]. 煤质技术, 2021, 36(3): 30-34.
- [2] 李福勤, 王丛, 郑庚州, 等. 煤矿矿井水处理技术现状与展望[J]. 工业水处理, 2024, 44(9): 1-8.
- [3] 靳鹏晨. 煤矿井下排水系统的优化设计[J]. 煤矿机械, 2024, 45(6): 17-19.
- [4] 焦亚军. 基于多阶段决策的煤矿井下排水控制系统优化设计[J]. 江西煤炭科技, 2024(3): 318-321.
- [5] 史志红. 煤矿智能化排水系统的应用研究[J]. 煤炭工程, 2024, 56(10): 153-159.
- [6] 王国法, 杜毅博. 煤矿智能化标准体系框架与建设思路[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 1-9.
- [7] 李明生, 石静. 煤矿多水平排水智能控制系统的设计与研究[J]. 冶金管理, 2023(2): 109-112.
- [8] 蒋培洪, 欧阳远波, 刘武. 基于加压泵站恒压自动供水的中控系统设计[J]. 机电工程技术, 2022(11): 207-211.
- [9] 吴文臻. 矿用多水平智能排水系统的应用研究[J]. 煤矿机械, 2022, 43(10): 166-168.
- [10] 李钢. 基于模糊 PID 控制的恒压供水系统的研究[J]. 电子设计工程, 2024, 32(13): 83-87.
- [11] 张维, 强华. 基于 STM32 的智慧农业大棚温湿度监控系统的设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2025(05): 36-41.
- [12] 王一晖, 徐法虎, 韩腾飞, 等. 基于云边端的小麦田智慧灌溉系统[J]. 农机化研究, 2025, 47(12): 224-232.
- [13] 徐尚瑜, 张燕, 陈文君, 等. LoRa 低功耗农业传感终端的设计与研发[J]. 传感技术学报, 2021, 34(12): 1690-1696.
- [14] 曹凯华. 基于 LoRa 技术的物联网通信协议研究与设计[D]. 赣州: 江西理工大学, 2023.
- [15] 曹小华, 李泊桓, 徐上尉. 基于 MQTT 协议的物联网岸电监控系统[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(03): 11-16+27.
- [16] 刘申, 杨亮亮. 基于阿里云物联网平台的鸡舍环境监控系统设计[J]. 南方农机, 2024, 55(18): 148-151+169.
- [17] 王震鲁, 戴硕, 白涛. 基于 STM32 和 4G 的牛舍环境监测与调控系统设计[J]. 电子设计工程, 2025, 33(18): 21-25.

(上接第 17 页)