

智能化煤矿水务技术的发展与展望

郭中权 崔东锋

中煤科工集团杭州研究院有限公司（以下简称中国煤科杭州研究院）作为环保科技型企业，一直致力于煤矿水处理与利用技术的研究，在高盐矿井水处理、煤矿井下水处理、含氟矿井水处理、酸性矿井水处理、煤矿生活污水处理等方面研究了30余年，取得了一系列科研成果和工程应用，是我国煤矿水处理技术的开拓者和引领者。近年来在煤矿智能化建设的大潮中，中国煤科杭州研究院深挖智能化技术在煤矿水务中的应用，也取得了从装备到系统再到平台的一系列技术成果。

煤矿水处理关键技术

高盐矿井水处理

高盐矿井水具有含盐量高、溶解性盐类成分复杂、不同盐类含量悬殊等特点，针对常规零排放处理过程中除硬规模大、采出率较低、投资及运行费用高等问题，中国煤科杭州研究院开发了多类型高盐矿井水“分步协同预处理+多级耦合膜浓缩+多组分分盐结晶”及全过程节能降耗处理技术。分步

协同预处理以满足不同类型膜系统在当前处理阶段的防污染、防结垢的目的，分步进行适度、协同预处理，从而降低预处理规模，提高药剂效率；多级耦合膜浓缩处理，根据不同类型膜系统处理典型高盐水的性能特点，确定膜处理工艺的性能边界及其耦合作用，实现多种膜系统耦合处理高盐矿井水，从而降低处理费用，提高处理效果；多组分分盐结晶技术针对高盐矿井水浓缩后的浓盐水水质特征，通过优化集成热法结晶分盐、冷冻结晶分盐和纳滤/热法结晶分盐3种不同的结晶分盐工艺技术，实现分盐结晶的稳定高效运行；通过加强高盐矿井水零排放全过程的能源及热量管理，提高能源利用效率，降低运行费用，以实现高盐矿井水零排放过程中的高效低耗处理。高盐矿井水零排放处理成套设备如图1所示。

煤矿井下水处理

根据煤质及采煤工艺的不同，针对矿井水中颗粒物粒径大、尺寸悬殊、悬浮物含量高、水仓易淤积、主排泵易磨损、故障率高及井下“三机”用水



图1 高盐矿井水零排放处理成套设备

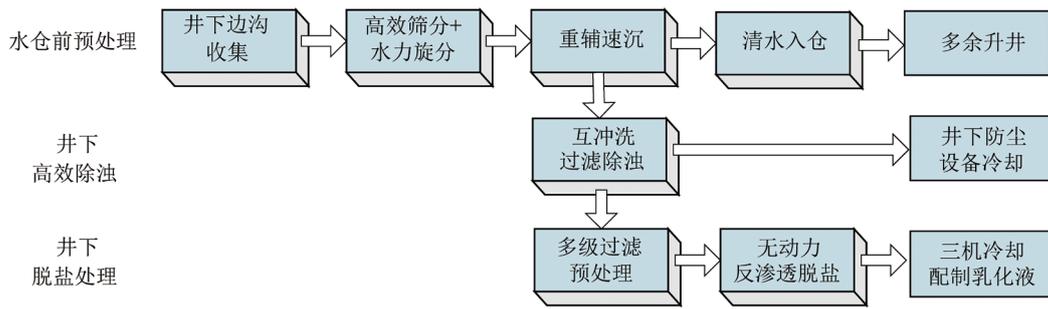


图2 煤矿井下水处理技术路线

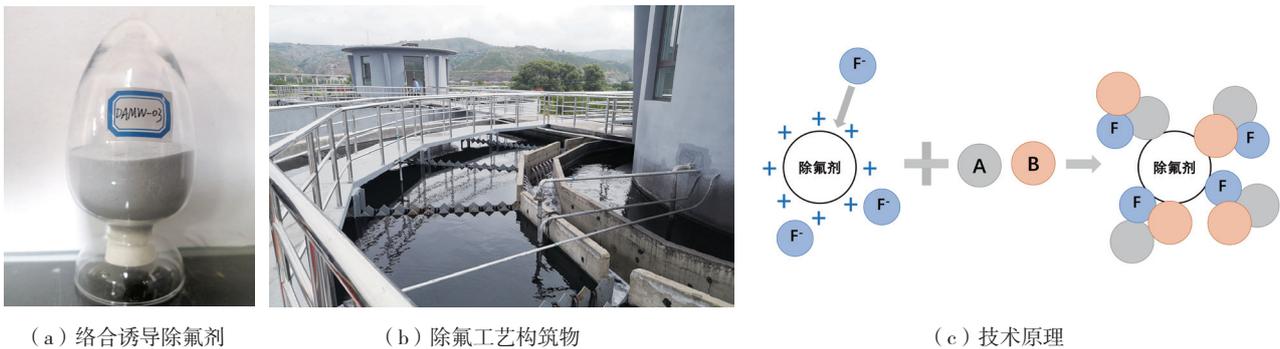


图3 络合诱导除氟剂、除氟工艺构筑物和技术原理

和乳化液配制用水品质要求高等问题，中国煤科杭州研究院研发了高悬浮物矿井水源头分级处理和井下分质利用技术，实现了“清水入仓”的同时为井下生产提供了高品质用水，解决了“三机”冷却及电控系统易腐蚀、结垢、堵塞等难题，保障了井下安全生产。通过高效筛分、水力旋分与重辅速沉协同强化，在井下源头进行分级处理去除颗粒物及大部分悬浮物，以提高综合去除效率，实现清水入仓，缓解水仓淤积和主排泵磨损；按照差异化利用原则，采用互冲洗过滤除油处理，以满足井下防尘、设备冷却用水；采用多级过滤预处理+无动力反渗透脱盐处理，为井下采煤机、刮板输送机及液压支架等“三机”提供冷却用水和乳化液配制用水。煤矿井下水处理技术路线如图2所示。

含氟矿井水处理

含氟矿井水处理的关键技术是指结合原水氟化物含量和伴随污染物主要类型特点，如高悬浮物矿井水或高盐矿井水，采用高效、经济、合理的除氟

处理技术，以实现出水氟化物含量达到《生活饮用水卫生标准》（GB 5749—2006）或《地表水环境质量标准》（GB 3838—2002）中Ⅲ类水对氟化物含量限值小于1.0 mg/L的要求。中国煤科杭州研究院研发的含氟矿井水处理关键技术，包括络合诱导结晶高效除氟技术和双膜增浓沉淀除氟技术等。针对高悬浮物含氟矿井水的水质特点，在不改变原有净化处理工艺路线的前提下将络合诱导技术与矿井水净化处理技术进行融合，通过多点分段投加混凝剂和除氟剂，将悬浮物与氟化物一并去除。络合诱导除氟剂、除氟工艺构筑物和技术原理，如图3所示；针对高盐含氟矿井水的水质特点，采用双膜浓缩工艺提升水中氟化物的初始浓度，为化学沉淀处理提供了较高浓度条件，克服了低浓度时沉淀反应效率低的问题，保证了膜处理与化学沉淀协同作用。

酸性矿井水处理

酸性矿井水是指pH值小于6的矿井水，富含重

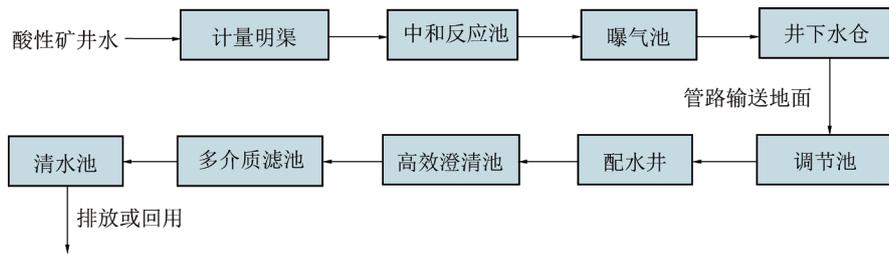


图4 酸性矿井水井下与地面协同处理系统

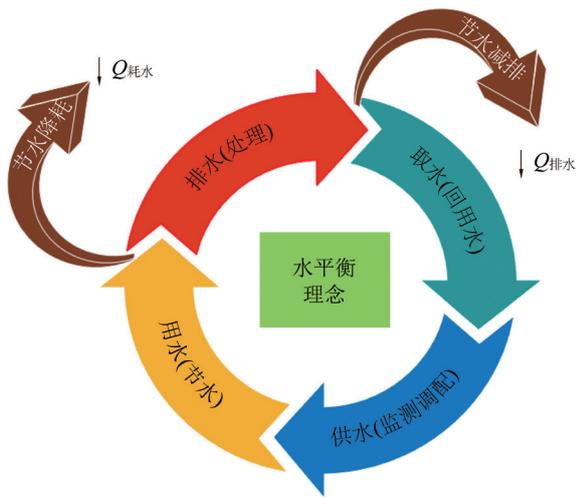


图5 煤矿水资源链中的全过程水平衡示意

金属离子和硫酸盐，涌水量大，治理难度高。中国煤科杭州研究院针对酸性矿井水酸度高、铁含量高等问题，研发了井下快速中和预除铁+地面深度净化除铁技术，构建了酸性矿井水井下与地面协同处理系统，如图4所示。在该系统中，通过在线监测和自动化控制实现了精准加药、深度除铁和节能降耗，大幅节省了碱性药剂的投加，减少了酸性矿井水长距离输送对管路和设备的腐蚀，出水总铁及pH值达到《地表水环境质量标准》（GB 3838—2002）Ⅲ类要求。

煤矿生活污水处理

煤矿生活污水具有低碳源水质特征，存在深度脱氮除磷难度高的问题。近年来，内蒙古、陕西、山西、山东等省份（自治区）对煤矿生活污水处理后的出水，提出了更高的排放要求甚至不让外排，

若外排则需参照《地表水环境质量标准》（GB 3838—2002）中Ⅲ/Ⅳ类要求。中国煤科杭州研究院针对煤矿生活污水高标准排放及回用要求，研发了准Ⅲ/Ⅳ类标准的同步生物氧化池工艺，以及煤矿生活污水处理工艺，已成功应用于山东能源集团、中煤能源集团、淮南矿业集团、淮北矿业集团的高氨氮生活污水处理工程，也取得了较好的处理效果。

煤矿水平衡

煤矿水平衡的关键技术是指煤矿企业内通过水平衡测试确定用水水平和吨煤用水量，从而进一步确定用水定额，为煤矿企业实施科学用水管理、节水减排措施和水资源合理调配等工作提供科学依据。煤矿水平衡关键技术体现在水资源链中的全过程水平衡理念中，可实现节水降耗和节水减排的目的，如图5所示。水平衡关键技术涵盖了取水、供水、用水、排水和耗水等方面的水平衡测试关键技术、管网监测智能化和可视化关键技术、水平衡大数据收集与分析及信息利用等关键技术。

煤矿水处理自动化

中国煤科杭州研究院在矿井水处理方面开发和构建了自动加药系统、自动排泥系统、超滤装置多组并列自动运行系统、反渗透装置多组并列自动运行系统、超滤膜和反渗透膜清洗和更换预警系统、反渗透产水率和脱盐率预警与控制系统、膜浓缩预处理水质对脱盐工艺的影响分析与控制系统等；在煤矿生活污水处理方面开发并构建了生化单元曝气量自动控制系统、碳源等药剂投加量自动控制系



图6 智能化煤矿水务建设层级

统、活性污泥回流自动控制系统等，这些系统在我国的山东能源集团股份有限公司兴隆庄煤矿、东滩煤矿、济宁二号煤矿、济宁三号煤矿，淮南矿业集团潘集第三煤矿、潘北煤矿，以及冀中能源股份有限公司邢东煤矿等多个煤矿进行了推广应用。

智能化煤矿水务的发展思路

煤矿水务是指煤矿的原水（水源）、煤矿水处理（净化处理）、供水（中水回用）、排水等单元（简称“源-净-供-排”）构成的整个水资源链以及相关的生产经营活动。煤矿水务在煤矿生产运行过程中发挥着不可替代的作用。智能化煤矿水务是指以煤矿水务和配套的智能装备为基础，将工业互联网、大数据、云计算、人工智能等技术应用到煤矿水务的“源-净-供-排”整个水资源链中，通过信息化和数字化手段对感知数据进行整合、分析和应用，使信息资源与生产经营深度融合，以实现设备智能运行、状态智能监测、过程智能控制、参数智能调节、预测智能动态、管理智能精细、分析决策智能可靠等煤矿水务的智能化运行模式，最终达到水质合格稳定、工人劳动强度低、作业人员数量少、经济效益高的多重目标，使煤矿水务更加智能化。

智能化煤矿水务的建设，一般可以从3个层级来实施，自上而下，分别为系统智能化、单元智能化和环节智能化。智能化煤矿水务建设层级如图6所示。

顶层的系统智能化主要是智能化煤矿水务综合

运营平台的建设，聚焦煤矿水务全局，最大程度上实现煤矿水务“源-净-供-排”的全方位智能化运营；中间层的单元智能化主要针对煤矿水务的各子单元，以生产过程控制的智能化为主；底层的环节智能化主要是各水处理单元中对关键工艺环节运行及控制的智能化，以实现工艺运行参数进行精准控制。因此，智能化煤矿水务的建设是一个多层次、多单元的系统建设，需要自上而下的整体规划与设计，统筹布局，而实施过程中则需要自下而上逐级建设，不断完善。

智能化煤矿水务关键技术

智能化煤矿水务综合运营平台

（1）平台总体架构

智能化煤矿水务综合运营平台采用由数据感知层、ICT基础设施层、数据平台层、应用层组成的4层总体架构。

1) 数据感知层负责煤矿水务系统全要素信息的全面感知，该层的生产单元智能控制系统用于完成生产过程的集中智能化控制，生产保障系统用于完成对辅助保障系统的全面监控，2个系统直接面向生产过程，接收来自上层的各类智能决策结果，并完成生产过程中智能控制的执行及反馈。

2) ICT基础设施层负责提供运行基础环境与互联互通的网络，主要包括网络基础设施、云基础设施等。

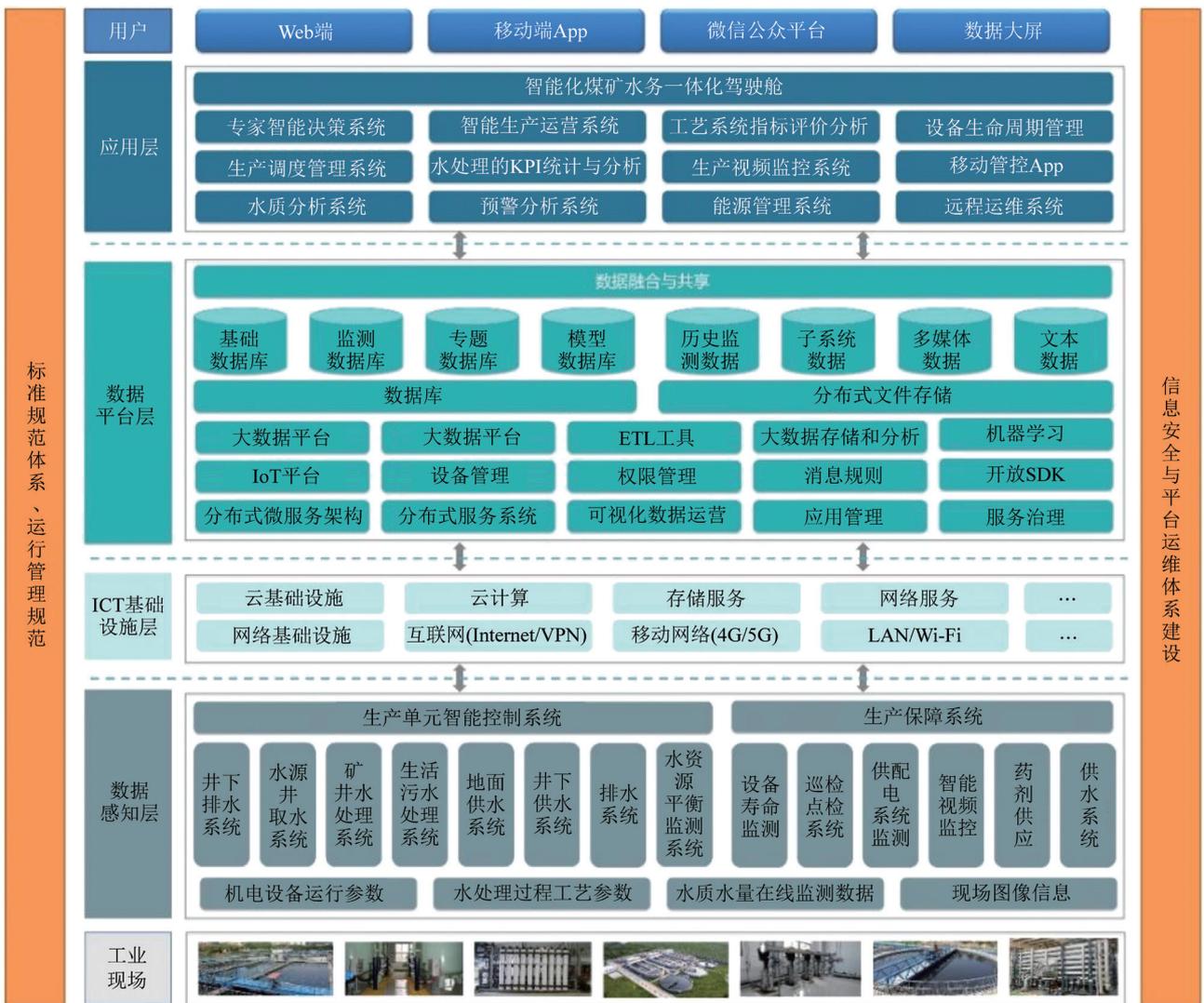


图7 智能化煤矿水务综合运营平台的总体架构

3) 数据平台层负责数据的分类、清洗、融合,形成基础数据库、监测数据库、专题数据库、模型数据库等,并对煤矿水务不同层级、不同单元、不同业务系统的数据资源进行融合,为智能化煤矿水务提供一体化的数据支撑。

4) 应用层则根据不同的需求功能,提供多种业务应用,采用微服务架构,通过向数据平台层发送应用服务请求或调用数据,获取基于大数据分析的应用结果,采用数据可视化技术,将各类业务应用结果以图形或图像的形式进行展现,并同时决策结果反馈给生产单元的智能控制系统,以实现煤矿水务系统的智能化运行。智能化煤矿水务综合运营平台的总体架构如图7所示。

(2) 平台的主要业务功能

遵循全面感知、智能控制、数据驱动、智能决策的理念,平台的主要业务功能包括:驾驶舱功能、基于实时数据和历史数据的分析功能、智能业务报表功能、智能预警和预测功能、专家决策支持功能及移动管控功能等,可全面展示煤矿水务的关键运行数据和生产考核指标,其中包括进水数据、产水数据、供水数据、排水数据、电耗数据、药耗数据、设备数据等。智能化煤矿水务监控大屏如图8所示。

矿井水处理智能化关键技术

(1) 矿井水净化处理智能加药与智能排泥

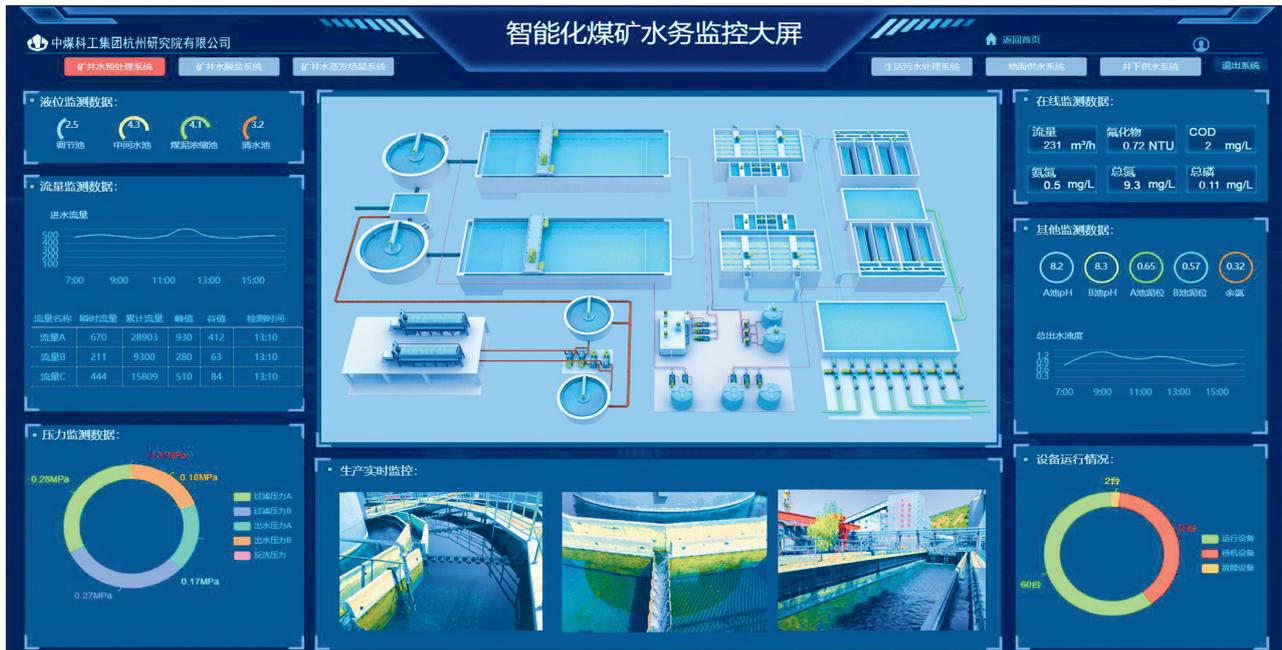


图8 智能化煤矿水务监控大屏

加药与排泥是矿井水净化处理中重要的工艺环节，直接影响出水水质和运行成本。中国煤科杭州研究院开发的智能加药与智能排泥技术将水质（浊度、悬浮物、泥位）在线监测、水下絮体图像识别与粒径分析、加药量（排泥量）实时纠偏调节、可视化智能监控等技术融为一体，以提高加药的实时性和排泥的及时性，以高效、低成本、可靠安全的特点为矿井水净化处理加药与排泥技术提供升级保障。矿井水净化处理智能控制技术原理如图9所示。

（2）矿井水脱盐处理智能控制

脱盐处理是矿井水深度处理（零排放）的核心单元，涉及的工艺设备多，参数要求高。中国煤科杭州研究院开发的脱盐处理智能控制技术主要包括以下3个方面：

1) 药剂投加智能控制技术结合高盐矿井水水质和药剂的特性，依据影响因素赋值，构建投加量优化控制模型，形成进出水闭环反馈系统，通过多环智能控制算法，实现投加量实时适量纠偏调节功能。

2) 超滤单元多组并列运行与清洗智能控制技术，综合超滤装置运行的边界条件和步序逻辑关系，根据运行过程中的工艺参数，实时调整单组超

滤装置的各步序运行时间。当多组超滤装置并列运行时，应用智能算法实现公用冲洗装置的排队控制和插队控制。

3) 反渗透系统运行与清洗智能控制技术，可通过分析压力、温度、电导率和流量等多参数控制边界，构建膜污染预测和防控模型，利用研发的智能控制算法，实现膜系统清洗的智能化控制。

煤生活污水处理智能化关键技术

煤矿生活污水处理智能控制技术原理（图10），主要包括智能曝气控制、回流与排泥智能控制2个部分。

（1）智能曝气控制

智能曝气控制通过活性污泥动力学模型和溶解氧多变量控制理论计算得到微生物需氧量，利用实时在线监测数据建立动力学模型，通过优化控制策略和智能算法进行纠偏调节，从而精准控制生化系统的曝气强度和溶解氧浓度。

（2）回流与排泥智能控制

回流与排泥智能控制技术主要体现在回流与排泥系统中设备运行的控制策略和模拟逻辑设计。控

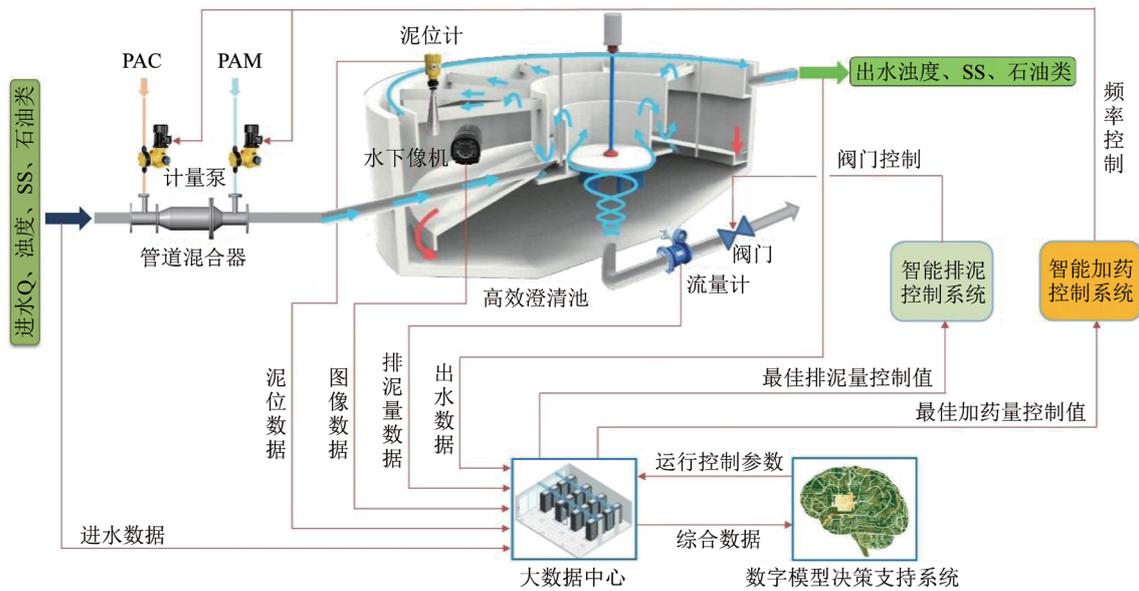


图9 矿井水净化处理智能控制技术原理

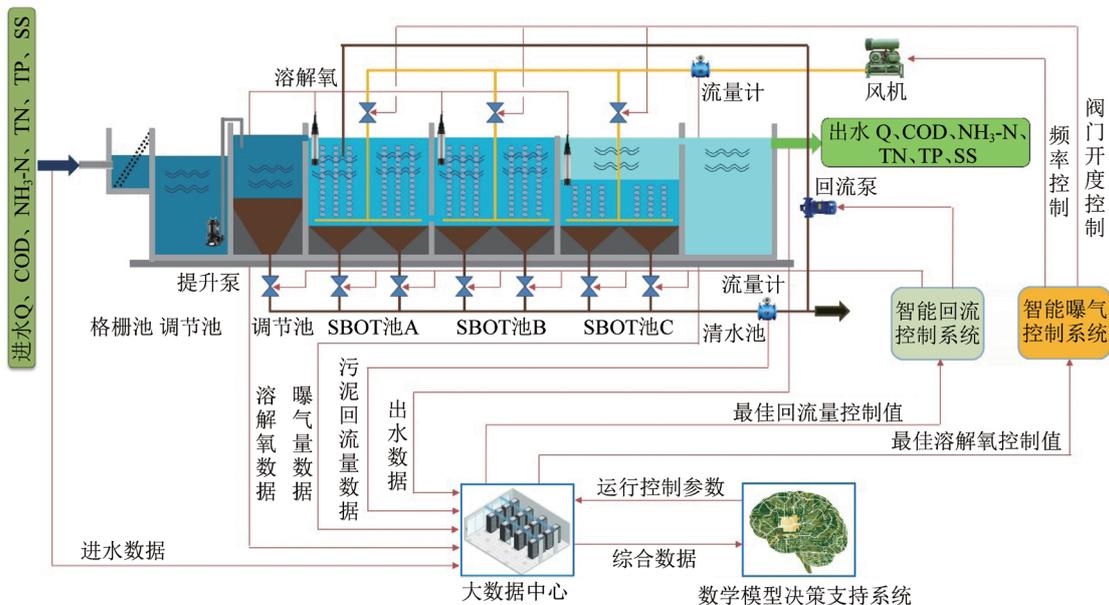


图10 煤矿生活污水智能控制原理

制策略设计用于保证回流和排泥的操作过程，模拟逻辑设计利用模糊逻辑和神经网络技术，建立模糊神经网络模型，通过仿真模拟得到模糊控制规则，并根据输入变量确定输出变量，实现回流和排泥参数的精准控制。

煤矿地面供水智能化关键技术

地面供水智能控制主要是实现地面供水系统的

水资源动态平衡和调度优化。根据不同用水单元对水量、水质和水压的要求，利用物联网技术，实时监测供水系统和各用水点的运行状态信息（流量、压力和水质等），从而掌握煤矿水资源平衡状况，并通过水资源平衡模型的分析 and 计算，对供水系统中各执行装置进行调节，如供水泵投入的台数、水泵运行的频率、阀门的开关和开度等，以保证终端用水点对用水流量和压力的要求，从而提高供水安全性和经济性。



智能化煤矿水务建设存在的问题

智能化煤矿水务建设的根本目标是实现运营高效化、生产智能化、管理精细化、决策科学化、服务灵活化，以此为衡量标准，对我国现有智能化煤矿水务的建设情况进行了梳理，发现主要存在以下5个问题：

(1) 构建煤矿水处理设施（设备）故障诊断和预测模型，仍是煤矿水务智能化建设的主要难点，目前尚未能真正实现高水平智能化煤矿水务。

(2) 煤矿水务系统的基础信息感知仍存在一定的缺陷，包括监测精度、监测频率、监测广度3个方面，数据质量也存在不可靠的问题。

(3) 智能化煤矿水务“源-净-供-排”各子单元的建设和实施水平不平衡，其中“源、净、排”3个子单元相对比较深入，功能也较为完善；而“供”子单元的深度不够，功能也不完善。

(4) 多数智能化煤矿水务建设过程中只有数据的采集与展示，缺少有针对性的数据分析模型和控制算法，没有形成数据的闭环应用，对数据价值的挖掘潜力不够。

(5) 煤矿水务系统的智能化装备欠缺，例如尚无水处理智能巡检装备、智能化加药装备等，底层的执行力较低，无法支撑智能化平台的高效运行。

智能化煤矿水务的规划与展望

随着各类新技术的不断发展和完善，智能化煤矿水务也将逐步向少人化、无人化以及远程化的目标迈进。未来智能化煤矿水务的发展方向将主要聚焦在以下5个方面，这也是中国煤科杭州研究院进行技术突破的重点。

(1) 研究开发矿井水、生活污水处理的智能化装备，如智能化刮泥机、智能化浓缩机、智能化压滤机、智能化加药装备等，使装备具备自我控制、自我调参、自我学习的能力，从而保障水处理单元

的高效运行，提高整个水处理系统的智能化水平。

(2) 研究矿井水、生活污水处理关键工艺环节控制参数的智能化调节技术，开发以数据分析模型、控制模型为基础的多参数融合智能控制算法，以实现对工艺控制参数的精准调节。

(3) 研究煤炭企业水资源实时跟踪及动态调配技术，实现全矿区取水、净水、供水、用水、排水的全面规划和综合平衡，从而提高水资源的利用率，降低污染物的排放量。

(4) 研究开发水处理关键工艺设备的故障诊断技术，如超滤、管式微滤、反渗透、电渗析等设备，形成基于历史运行数据和状态最优参数的设备状态诊断方法，并及时对设备的运行状态进行反馈和预警。

(5) 研究开发基于3D数字孪生的智能化煤矿水务平台，对煤矿水务系统的构筑物、生产设备、管网等进行超精细三维数字化复原，并与实时生产数据进行同步，形成基于虚拟现实的煤矿水务整体视图，实现物理水务与数字水务的交互与融合，从而实现煤矿水务的透明化管理，全面提升管理效率。

结语

智能化煤矿水务系统建设既是落实《煤矿智能化建设指南（2021版）》的要求，也是实现煤矿水资源动态调配管理、水处理系统智能化运行、水务管理精细化、生产效率提升、节能降耗、减人少人的必由之路。因此，推进智能化煤矿水务系统的建设将较大程度上提升煤炭企业水资源运营和管理的智能化水平。

■ 责任编辑：李文颀

作者简介：

第一作者：郭中权，研究员，硕士，现任中国煤科杭州研究院党委副书记、总经理，长期从事煤矿矿井水、生活污水、煤化工废水、市政污水和其他工业废水方面的科研、设计、咨询等工作。E-mail:gzq163@163.com

作者单位：中煤科工集团杭州研究院有限公司