

## 基于云边端协同架构的盐湖化工生产管控一体化系统与应用

刘祗炬, 王雅琳, 刘晨亮, 隋庆开, 陈焱涛, 李思龙, 戴饶, 谭栩杰, 桂卫华

(中南大学自动化学院, 长沙, 410083)

**摘要:** 盐湖资源是我国的重要战略性资源, 其生产过程呈现出“资源-产品-废物排放”的线性流动模式, 存在资源利用效率低和废料排放严重等问题。在盐湖资源综合利用的智能化和数字化转型中, 工业软件扮演着关键角色。然而, 由于盐湖资源稀缺且分布有限, 专用于盐湖资源生产开发的工业软件难以进行大规模商业化推广。因此, 当前盐湖化工生产过程中的工业软件仍未能迈入智能化时代。为应对这一问题, 本文深入分析了盐湖化工生产过程中的多工序分布范围广、数据关联耦合严重、非线性化程度高等特点, 提出了一种基于云边端协同架构的盐湖生产管控一体化系统。该系统实现了全厂设备的互联互通、核心工序的分布式监控以及多工序的协同优化决策, 从而提高盐湖化工生产的精细化程度。在西部某大型盐湖化工企业进行了系统的部署和试运行。试验结果验证了所开发系统的有效性, 成功降低了钾盐开发过程中的资源消耗, 提高了生产效率。这项研究为盐湖资源开发的智能化转型提供了可行的解决方案, 具有重要的理论和实践意义。

**关键词:** 盐湖化工; 工业软件; 云边端协同; 生产管控一体化

An Integrated System and Application for Salt Lake Chemical  
Production Management and Control Based on Cloud-Edge-Terminal  
Collaborative ArchitectureDiju Liu, Yalin Wang, Chenliang Liu, Qingkai Sui, Yitao Chen, Silong Li, Rao Dai, Xujie Tan,  
Weihua Gui

(School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Salt Lake resources are important strategic resources in my country, and their production process presents a linear flow pattern of "resources-products-waste discharge," which has problems such as low resource utilization efficiency and serious waste discharge. Industrial software plays a key role in the intelligent and digital transformation of the comprehensive utilization of Salt Lake resources. However, due to the scarcity and limited distribution of Salt Lake resources, industrial software dedicated to producing and developing them makes it difficult to carry out large-scale commercial promotion. Therefore, the industrial software in the current Salt Lake chemical production process has not yet entered the intelligence era. In order to deal with this problem, this paper deeply analyses the characteristics of the Salt Lake chemical production process, such as the wide distribution of multiple processes, severe data association coupling, and a high degree of nonlinearity. It proposes an integrated system of Salt Lake production management and control based on the cloud-edge-terminal collaborative architecture. The system realizes the interconnection of equipment in the whole plant, the distributed monitoring of core processes, and the collaborative optimization decision-making of multiple processes, thereby improving the refinement of Salt Lake chemical production. The system deployment and trial operation were conducted in a large Salt Lake chemical enterprise in the west. The test results verified the effectiveness of the developed system, which successfully reduced the resource consumption in the process of potash development and improved production efficiency. This study provides a feasible solution for the intelligent transformation of Salt Lake resource development and has important theoretical and practical significance.

**Keywords:** Salt Lake Chemical Industry; Industrial software; Cloud-edge-terminal collaboration; Integration of production management and control

基金项目: 国家重点研发计划项目“盐湖化工产业集聚区域网络协同制造集成技术研究与应用示范”(2020YFB1713800)

作者简介: 刘祗炬, 男, 1998年生, 博士研究生, 研究方向为流程工业智能优化制造, 中南大学自动化学院, 410083, djliu@csu.edu.cn; 王雅琳, 女, 1973年生, 教授/副院长, 研究方向为复杂工业过程建模与优化、工业大数据解析、智能调度与优化决策、机器学习与模式识别等, 中南大学自动化学院, 410083, ylwang@csu.edu.cn 等

## 0 引言

盐湖资源是富含钾镁锂钠硼等矿物的国家重要战略资源，广泛应用于农业、信息等领域。我国盐湖主要集中在新疆、青海等西部地区“一带一路”核心地带，积极推进西部地区盐湖资源综合利用，是深入实施西部大开发的重要任务<sup>[1]</sup>。

尽管盐湖化工企业在资源开发方面取得了一定成就，但目前大部分企业的生产模式仍然较为传统，呈现出“资源-产品-废物排放”的线性流动模式<sup>[2]</sup>。这种模式导致了资源的低利用率和排放物的高排放量，影响了生产效率和环境保护<sup>[3]</sup>。此外，盐湖化工生产工序之间呈串联关系，前置工序问题可能会传递到后续工序，从而影响最终产品的品质<sup>[4]</sup>。例如，一个工序中的不完全反应或杂质可能会导致后续工序中产品质量下降，进而影响到整个生产过程的稳定性和可靠性<sup>[5]</sup>。由此可见，不同工序的运行参数和控制策略相互影响<sup>[6]</sup>，多工序协同控制是盐湖化工过程控制的重要议题之一<sup>[7]</sup>。但是目前盐湖化工过程控制以人工决策为主，生产管理与操作智能化水平不高，工序间控制优化策略分立，计划调度的决策信息难以与实时性要求高的控制优化充分联动，阻碍生产过程的高效运行。因此需要全新一体化架构以统一、协同实现控制、优化、调度<sup>[8]</sup>。

工业软件能够提供高效、可靠和创新的解决方案，促进工业领域的数字化转型和智能化升级，从而推动生产效率的提升、成本的降低<sup>[9]</sup>。工业软件通过数据采集、实时监测和分析，能够帮助企业识别生产过程中的瓶颈和效率低下的环节。通过优化生产流程，企业可以提高产能，降低能源和原材料消耗，从而实现更高的生产效率和更低的成本<sup>[10]</sup>。此外，工业软件可以实时监测关键指标，检测生产过程中的异常，并采取措施进行及时纠正，确保产品质量稳定和符合标准<sup>[11]</sup>。同时，工业软件收集和分析大量的数据，为企业提供数据驱动的决策支持。凭借这些数据，企业可以做出更加准确的生产计划和资源配置，优化库存管理，降低生产风险<sup>[12]</sup>。流程工业通常涉及分布在广泛区域的设备和工厂，工业软件可以实现远程监控与管理<sup>[13]</sup>。企业可以通过云平台或物联网技术，随时随地监控生产情况，及时进行故障诊断和维护，降低停机时间和维修成本<sup>[14]</sup>。综上所述，工业软件在流程工业中能够优

化生产过程、提高生产效率、保障产品质量、支持数据驱动决策，以及实现远程监控与管理。这些优势有助于解决盐湖化工生产过程中存在的问题<sup>[15]</sup>。

但是由于盐湖化工行业是地域性明显的国有资源型行业，只在全国新疆、青海等少数几个地方可开采盐湖资源<sup>[16]</sup>。虽然经济效益明显但是生产企业却十分集中难以形成行业规模效应，因此目前没有商业化公司或机构针对盐湖化工过程设计工业管控软件，这也是导致盐湖化工生产过程控制粗放的原因之一。为了解决这个问题，本文深入分析了盐湖化工生产过程特点，设计了基于云边端协同架构设计的管控一体化系统，实现了对硫酸钾生产过程的管控，极大提升了生产效率，为未来盐湖行业的智能化转型升级提供了新思路。

## 1 盐湖化工生产管控一体化系统需求分析

本节首先分析盐湖化工生产过程并总结出该过程管控一体化难点，在此基础上从功能性和非功能性两个角度分析系统需求并设计系统总体功能架构。

### 1.1 盐湖化工生产过程简介与难点分析

#### （一）盐湖化工生产过程简介

图1展示了资源型盐湖生产过程工艺技术流程<sup>[17]</sup>。首先开采的原卤经多次晒矿得到钾盐镁矾（ $\text{KMg}(\text{SO}_4)\text{Cl}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ）和光卤石（ $\text{KCl}\cdot \text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ）两种原矿。钾盐镁矾在软钾系统种经磨矿、转化、浮选、分离等步骤转化为软钾镁矾（软钾， $\text{K}_2\text{SO}_4\cdot \text{MgSO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ），而光卤石则在粗钾系统中经分解、浮选、分离等步骤转化为氯化钾（粗钾， $\text{KCl}$ ）和一些杂质盐。最

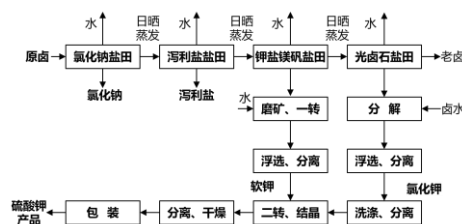


图1. 资源型盐湖生产过程流程图

后粗软钾在洗涤工序充分混合并去除杂质后进入二段转化反应器中结晶，结晶物后经离心、干燥、包装等后处理工序后得到硫酸钾成品。

从上述描述可知，盐湖硫酸钾资源开发是典型大范围、长流程工业过程，其最终产品质量依赖于多道工序间的协同配



合，尤其是软钾系统、粗钾系统和硫酸钾系统等三个核心子流程。每道工序都含有众多不同的设备，依靠人力协同控制这成千上万的设备以达到最优化生产状态是件不可能的事，因此开发盐湖化工生产管控一体化系统的任务迫在眉睫。

## （二）盐湖化工生产过程管控一体化系统设计难点分析

1) 生产流程长、工序多，不同工序间协同控制难。从前文描述可知，盐湖资源加工过程涉及数十道工序，它们之间过程关联性强，管控系统设计时不仅需要考虑单一工序内多设备间的协同控制，更要兼顾不同工序间的联动配合。这就要求系统开发时需以粗钾、软钾等关键中间产物为抓手，设计合理的中间产物质量控制指标以此切分复杂长流程、降低系统耦合度。

2) 不同工序生产特点各异，难以设计统一的控制方案，需对每个工序定制化设计管控方案。不同工序中的核心控制设备不一致导致相应的工序内管控方案也不尽相同，这就要求系统设计时需充分考虑不同工序生产特点，制定围绕工序内核心生产设备的定制化管控方案。

3) 设备数量多、空间分布广、产生的数据量大，且部分设备对于控制实时性要求高，传统集中式处理数据再分发至各工序的方案难以满足要求。设备内传感器数据是对生产状态最真实的反映，但数以万计的高频传感器数据对通信带宽、系统处理能力均是极大的挑战。此外，部分核心设备控制实时性要求高，这进一步加重了管控一体化系统和通信基础设施的处理负担。因此，需设计一个即不损失全局数据统筹处理能力又能满足部分设备实时性控制要求的系统架构。

### 1.2 管控一体化系统构建需求分析

针对上述盐湖化工管控系统的难点，本文研究管控一体化系统基于云边协同架构，利用物联网、辅助决策、自动化控制技术，配合人工智能技术，提供“监管控”一体化盐湖化工过程最优化生产解决方案。在实际控制过程中要实现上述目标，系统功能需实现包括数据采集、大数据分析、多工序协同调度、核心工序监控和用户管理等五个核心需求，可总结如图2所示。

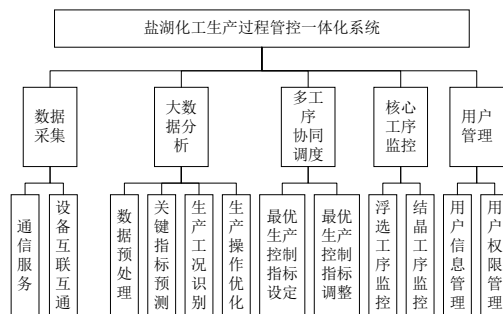


图2 盐湖化工过程生产管控一体化系统总体功能需求示意图

1) 数据采集：数据采集部分是管控一体化系统的重要组成部分之一，负责收集全厂范围内的所有设备的数据采集和管理。具体需求如下：通信服务，负责边缘节点设备管控通；设备互联互通，为设备间协同监控提供基础。

2) 大数据分析：为后续一系列控制模块提供核心算法支持，具体任务需求如下：数据预处理功能，包括缺失数据填补、高噪数据清洁、虚拟样本生成等；关键指标预测，构建难以实时检测的关键控制指标预测模型为后续过程控制提供指导；生成工况识别，结合多模态数据和人工智能算法实时判断当前生产状态。

3) 多工序协同调度：从全局视角协调各子工序间的分段控制指标以确保生产的全局最优化，具体任务包括：最优化生产控制指标设定，利用智能算法将最终产品控制指标分解为多个子工序的中间质量控制指标；最优生产控制指标调整，当生产工况转变，自适应调整各子工序生产控制指标。

4) 核心工序监控：监控影响最终产品质量的浮选和结晶两个核心工序，具体而言对两个工序的关键设备监测和控制。

5) 用户管理：实现用户登录、注册、密码修改等信息管理功能以及不同级别用户赋予不同系统权限的管理功能。

## 2 盐湖化工生产管控一体化系统详细设计与实现

### 2.1 云边端协同架构设计

为了适应盐湖化工生产过程空间分布广、反应流程长、工序间复杂耦合等特点，本文针对性的设计了如图3所示的云边端协同的管控一体化系统架构，并在此基础上开发了盐湖化工过程管控一体化系统。该架构分为生产终端、工业总线、边缘云和中心云四层，自下而上数据逐级汇聚，在中心云得到大数据处理结果逐级向下分

发直至终端响应任务。这种云边端协同结构使得整个系统更具弹性、可扩展性和可

步下发至终端设备执行。当部署新的模型或模型性能退化需要更新时，中心云都会

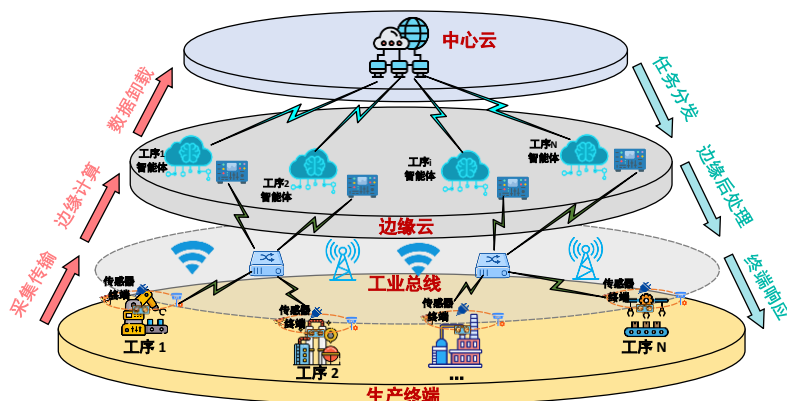


图 3. 盐湖化工过程云边端多层协同架构示意图

靠性，同时兼顾了低延迟和高性能的优势。

生产终端属于设备基础设施层包含有整个盐湖化工生产全流程所有工序与设备以及围绕每个工序安装的传感器终端。各工序的传感器系统将记录海量的设备运行信息，是生产状态最准确的反应。生产终端层中的传感器设备采集到数据后将通过工业总线传输至边缘云层从而实现底层数据上云。

工业总线层属于通信基础层，是底层数据通信网络，利用工业以太网和 WiFi6 等技术构建连接最底层的生产控制终端和各工序计算智能体的通信系统。

边缘云中含有多个智能体，其中每个解耦工序都对应一个或多个边缘智能体，它们大多构建于物理层面接近工序设备的地点用于处理收集得到的数据，进行数据预处理、初步建模、模型推理以及一些时效性强的控制任务。生产终端收集的海量数据直接上传至中心云将给通信设施带来巨大负担，并且中心云直接处理含有大量冗余信息的低质数据也会降低系统运行效率。因此选择进一步增加边缘云层用于缓解中心云处理压力，同时也可以降低数据间的耦合。

中心云是核心层，构建于整个流程的中控室用于监控整个生产流程的运行状态。中心云得到边缘云初步处理后的数据将进一步对其建模、优化等任务处理，而后将处理结果反馈至边缘云后处理后进一

利用其巨大的算力迅速完成这些工作。

总而言之，本文所构建的云边端协同架构是多步分层闭环结构，解耦后的单个工序内收集的数据首先上传至边缘云进行初步处理以清洗简化数据，同时将一些计算量小且实时性要求高的任务计算完毕并反馈至生产终端执行，而计算量大的任务数据将进一步上传至中心云利用大算力解决。中心云得到各工序边缘云数据后将集中协同处理并将处理结果解耦分发至各边缘云。边缘云收到中心云处理结果后进行解码适配等后处理将结果转换为终端设备可执行指令并下发。生产终端执行下发指令后又会将新的状态按照上述流程反馈至中心云以此构建管控闭环。生产终端不部署任何模型或算法也不进行任何计算，只负责采集上传数据与执行指令。边缘云部署一些训练好的模型用于数据预处理操作和模型推理等任务，有些算力足够的边缘智能体也会负责训练任务部分模型。中心云则拥有最强的算力，负责协调控制工序间任务、模型训练与更新、应用服务等任务，是整个系统的核心。

## 2.2 系统模块概要设计

基于上述讨论的云边端多层协同架构，在充分考虑任务需求后，将系统功能设计分发至不同层级，整体功能结构图如图 4 所示。

### （一）生产终端与工业总线



图 4. 基于云边端多层协同架构的盐湖化工管控一体化系统功能结构示意图

生产终端层和工业总线层被设计为绑定在一起的基础服务层，在这一层中主要设计了通信基础服务框架和设备互联互通以保障全厂数据传输顺畅。首先研究基于 WIFI6 通讯协议的全厂设备互联互通无线网络覆盖技术。根据罗布泊工厂不同场景、不同业务网络需求，采用 FITAP+AC 架构针对厂区内不同场景、不同业务网络需求部署相适应的 AP 终端，从而实现厂区的无线网络全覆盖。在网络安全方面，在原有网络核心交换机旁侧部署一台无线控制器 AC，实现 AP 终端的统一集中管理、监控和配置。最终选择 96 处 AP 点位进行网络信号测试点，结果均显示各区域信号强度  $> -65\text{dBm}$ ，最弱信号强度为  $-62\text{dBm}$ ，平均信号强度为  $-45\text{dBm}$ 。整体测试结果表明网络覆盖强度优秀，满足罗布泊工厂各类场景下的不同业务需求。

同时为了确保不同设备间可互联互通，数据统一管理，本系统采用基于 OPC UA 标准协议的方法开展研究。但由于实际生产流程中设备来源于不同厂家，如罗克韦尔、优耐斯特等，其生产厂家不同、出厂日期存在差异，存在设备不一定支持 OPC UA 通讯协议或者不支持安装 OPC

UA 相应模块的现象。为了使 OPC UA 信息模型可以在不支持 OPC UA 的设备中应用，设备与管理层系统之间设计了中间件。中间件可以看作是一个协议转换装置，它的功能包括协议转换功能、提供标准的通讯接口与通讯协议。这个中间件可以适用于一种或多种工业以太网或者现场总线。中间件通过创建对应协议的缓冲以缓存与不同通讯协议交互的数据。协议转换功能可以采用可拓展标记语言来实现缓冲区内各个数据的映射，映射内容包括数据内容、数据地址、数据读写属性等。从设备提取的数据内容存储到 OPC UA 地址空间中，并与原数据的格式相同。从设备提取的数据地址要与 OPC UA 中数据的地址相互对应。在数据转换的过程中应该满足实时性、无损性和高效性，从而实现盐湖化工核心生产工艺设备的互联互通。

## （二）边缘云

边缘云被设计为部署在离设备更近的网络边缘位置用于提供分布式算力的计算资源层。相较于中心化云数据中心架构，增加边缘云结构可以降低数据传输延迟和网络拥塞，从而实现更快速的数据处理和反馈。本文采用 NVIDIA 推出的 Jetson



Nano 作为边缘云计算中心，它采用四核 64 位 ARM CPU 和 128 核集成 NVIDIA GPU，可提供 472 GFLOPS 的计算性能。虽然算力有限不足只能支撑浅层模型训练和深度模型推理，但其具备性能稳定、体积小方便现场部署、接口丰富可兼容多类型设备等优点，可构建更加智能和高效的物联网系统。为了减少中心云计算负担、降低处理时延、满足盐湖生产过程中核心工序操作实时性要求，本文将数据预处理、关键指标预测、生产工况识别、生产操作优化等任务的模型推理部分部署于边缘云上。同时为了减少上传至中心云的实时数据量，边缘云层增加了一定容量的硬盘用于存储原始数据。

当终端设备采集到数据后首先在边端云上进行去噪、补全和扩充得到高质量数据集；接着采用部署在边缘云上的浅层预测模型、工况识别模型、操作优化模型等得到关键质量指标的实时预测值、生产工况实时状态、匹配得到的历史优秀案例等处理结果，或者采用部署在边缘云上对算力要求较小的深度大模型预处理模块（如变量选择、数据标准化、基于矩阵算子或卷积的局部提取模块等）得到初步处理结果；而后只将这些核心结果上传至中心云进行更高阶的任务处理而并非全部的原始数据。由于各设备大量的原始数据均分布式地在边端处理完毕，这极大降低了中心云的处理压力，也提升了边端设备的相应速度。当中心云汇集处理完所有设备核心数据并将操作变量设定值、大模型处理结果下发至边缘云时，其可以快速响应并将处理结果转化为终端设备可识别的指令，从而实现高效分层控制。

### （三）中心云与大屏应用监控

中心云，又称为“云中心”或“云核心”，被设计为位于整个管控一体化系统中的核心节点，负责集中管理、资源调配和大数据处理，是连接边缘设备和云端数据中心的桥梁。本文使用 32 核心 2.1GHz Intel Xeon Gold 6430 作为中心云 CPU，4 张 NVIDIA GeForce RTX4090 GPU 提供中心云算力，另提供 32TB 储存空间，可以同时处理盐湖化工生产过程中采收、浮选和结晶三大核心工序同时多类型任务请求。因为边缘云计算资源有限，本文将大数据分析、核心工序监控、多工序协同、数据管理等大算力需求任务部署于中心云上。

当中心云收到多个边缘云上传的任务请求时，首先根据任务类型和算力需求动

态地分配资源给特定的边缘设备或任务，以保持整个系统的高效运行；接着将边缘云上传的初步结果进一步利用大模型处理得到最终结果；而后为了保证整体生产过程的性能，中心云会将所有工序、设备的请求任务结果汇集并协同调度与重新调整以确保整体最优而非局部最优；此外，所有深度模型的训练与更新也部署于中心云上，当边缘云的推理结果与实际化验值相差甚远时就将触发中心云的模型更新，中心云会利用近段时间新保存的数据对退化模型进行再训练以维持其性能；同时，所有核心数据的管理功能包括数据保存、维护、查询与更新也部署与中心云中以便建模使用和可视化报表等。

对于生产操作人员而言，直观展示当前生产状态是提升工作效率的关键，因此生产数据报表功能是极其重要的。因此本文进一步在中心云上构建了大屏监控界面，为操作人员提供友好的可视化交互界面、丰富的报表、系统设置和管理等功能。

## 3 盐湖化工硫酸钾生产管控一体化系统应用

本节介绍在西部某大型盐湖化工企业生产现场部署了所设计的基于云边端多层协同架构的盐湖化工硫酸钾生产管控一体化系统并于现场试运行的情况。

### 3.1 设备安装

浮选和结晶工序是硫酸钾生产过程的两个核心子工序，其中浮选泡沫图像和结晶旋流器出料状态又分别是两个工序的重要监控信息，因此本节以这两个位点中的结晶旋流器出料状态监测为例展示系统设备安装。

但由于技术限制，结晶器内部转化情况目前无法观测。因此目前生产现场采用观测旋流器出料状态间接判断结晶器内部转化情况，这就要求结晶岗位需要配备 2-3 位工人进行工况巡检并及时反馈信息至中控室。由于工人操作经验的差异性，反馈的工况信息存在主观性强、随机性大等问题，这就导致以此为基础的结晶过程控制较为粗放。此外操作工人需要每天不间断、不定时轮班巡检，工作强度大。同时每班负责巡检的操作工人少但监控范围大，无法保证及时地反馈观测的信息，造成与中控间的信息传递滞后。为了提升硫酸钾结晶工序的监测有效性、旋流器操作调整的规范性、改善工人劳动条件和保障生产高效稳定运行，本系统在 6#旋流器组布置了

工业相机和边端云设备，而在厂房中控部署了中心云设备，二者采用云边端协同架构通信与控制。

将云端设备部署在硫酸钾厂的中控室，其中核心是服务器、显示器，负责执行数据处理、分析和可视化展示等任务。作为数据处理、存储和计算的中心，服务器具备强大的计算能力和大容量存储，能够高效处理来自边端设备的大量图像数据。为了确保软件系统的功能准确性，服务器需要接入生产数据库，以获取最新的生产数据信息，为软件系统提供准确的数据支持。这样的设计保证了软件系统的高效性和可靠性，能够为旋流器项目提供及时、精确的数据处理与分析结果，帮助实现旋流器出料口智能识别和操作指导的目标。云端设备中控部署完毕后如图 5 所示。



图 5. 云端设备部署示意图

边端设备部署时，综合考虑现场 6# 旋流器组的位置、布局，确保不影响工人的操作，并能够完整拍摄到出料柱。工业光源则部署在旋流器设备上，确保打光稳定有效。具体部署位置如图 6 所示。



图 6. 边端设备部署示意图

### 3.2 软件界面设计

软件系统部署于中心云服务器上，用于展示系统得到的各类结果并工操作人员设置系统细节，实现了图 2 中所需求的各类功能。除总监控和多工序智能协同调度任务部署的系统总监控界面、生产过程监控界面和生产调度优化界面外，由于浮选与结晶工序的功能、界面均较为类似，本文也以结晶工序监控子系统为例展示子工

序的界面设计。

#### （一）系统总监控界面

生产调度监控界面设计如图 7 所示，其主要功能是进行生产计划数据和生产调度数据的可视化展示，以帮助用户更好地了解硫酸钾厂的生产情况。



图 7. 系统总监控界面

界面上方为生产计划数据的可视化，其主要实现的功能包括：1.显示当年的月生产计划，可视化展示了光卤石上矿量、钾混盐上矿量、粗钾矿量、软钾矿量、结晶器进矿量、成品硫酸钾生产量等关键生产指标的每月生产计划，以辅助生产人员更好地安排、执行并完成每月的生产计划；2.显示当月的日生产计划，可以通过选择需要了解的生产指标，查询该指标当月每日的生产计划情况，以辅助生产人员更好地安排、执行并完成每日的生产计划；3.实时统计和展示当月及当日的生产累积情况，可通过右上方的按钮进行切换查看。

界面下方为生产调度数据的可视化，其主要实现的功能包括：1.展示浮选和结晶两个重要工序的钾收率情况以及到目前硫酸钾产品的质量情况，以辅助生产人员判断当前生产情况的优劣；2.统计和展示了水、蒸汽、电等重要能源以及 2#油、十八胺等重要辅料的消耗情况，以辅助生产人员判断物资使用情况及采购时间；3.统计和展示粗选 2#、精选 3#、旋流器 1#等设备的质量情况，以帮助生产人员更好地维护和保养生产设备，保障钾盐生产的安全高效稳定；4.统计了当日浮选和结晶班组人员的考勤情况。

#### （二）生产过程监控界面

生产过程监控界面设计如图 8 所示，其主要功能是生产过程数据的可视化以及可以通过该界面进入各个智能管控的子系统，从而帮助实现硫酸钾厂的智能管控一体化。

界面上方为生产过程数据的可视化，主要包括了以下的这几个部分的内容：1.原矿品位统计。统计并展示了光卤石和钾混盐中钾离子和硫酸根离子的浓度，该数据会随时间自动进行更新。2.工况化验指



标。使用折线图分别给出了浮选、结晶和成品三个硫酸钾生产关键阶段的相应化验指标数据，不同的生产阶段可通过右上方的按钮进行切换查看。3.设备运行状态。使用仪表图分别可视化显示了粗选 2#、精选 3#、旋流器等设备的质量情况，帮助生产人员更好地维护和保养生产设备，以保障钾盐生产的安全稳定高效。4.工序收率统计。展示浮选和结晶两个重要工序的钾收率情况，帮助生产人员更好地了解产品的生产情况，并做出优化调整。5.生产偏差监控。实时展示了浮选和结晶生产过程中钾离子和硫酸根离子浓度的预测值，其中白线为相应离子浓度的设定值，红线为相应离子浓度的预测值。中间的绿色区域为正常情况，表示当前的设定值与预测值相近，无需进行调整；上方的红色区域以及下方的蓝色区域为异常情况，表示当前的预测值相比于设定值过高或过低，需要进行调整。6.生产偏差调整。显示了对于当前浮选和结晶工序生产的操作建议，系统将通过调用后台算法自动进行调整，或者也可以通过下方按钮进入氯化钾浮选或硫酸钾结晶子系统进行手动调整，从而实现随实际生产流程的自适应更新以最大化提高生产效率。



图 8. 生产过程监控界面

界面下方为各个智能管控子系统的集成模块。整个生产调度计划层是处于硫酸钾厂生产流程的最上层，因此后续介绍的两个底层控制系统（氯化钾浮选工况识别与操作优化指导子系统以及硫酸钾洗涤结晶工序工况识别与操作优化指导子系统）的调用接口都被集成到生产调度界面。当操作人员点击跳转按键后就可进入相应子系统中对底层工序设备进行相应的管理操作。

### （三）生产调度优化界面

生产调度优化界面设计如图 9 所示，左侧红框区域为数据交互部分，右侧绿框区域为调度决策部分。数据交互部分主要实现与数据库交互、与 Excel 文件交互等，帮助操作人员管理生产数据并对历史数据

进行记录。调度决策部分调用后台智能算法帮助生成当前工作状态下的最优生产规划。



图 9. 生产调度优化界面

### （四）结晶子工序监控界面

如图 10 所示，界面左侧展示了洗涤结晶工序的流程示意图，包括关键过程参数在线测量数据显示与更新，其中每一个传感器位号的值都是实时传递的。右侧展示了对于当前生产工况的综合评价、工况的趋势评价的可视化结果、重要的质量指标（E2 母液中的钠离子浓度、钾离子浓度、水含量等）的预测曲线以及生产操作建议。同时也提供历史值的查询功能。

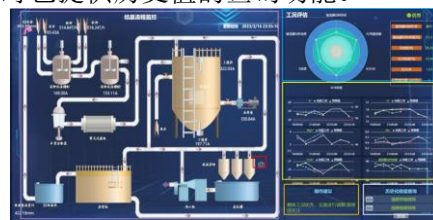


图 10. 结晶子工序监控界面

### （五）旋流器监控界面

旋流器视频监控界面的主要功能是实时监测并判别当前旋流器出料工况，它主要包含有监控视频显示模块、视频主要信息显示模块、旋流器出料浓度预测、旋流器出料工况识别以及操作建议，具体如图 11 所示。监控视频显示模块主要展示当前旋流器组的出料实时情况；视频主要信息显示模块主要展示经算法处理后得到的一系列结果值（旋流器出料柱散开角度、出料柱纹理情况等）；旋流器出料浓度预测模块则展示一段时间内对于旋流器出料柱产品浓度的预测结果；旋流器出料工况识别模块则展示对于当前出料工况的识别情况；而后在操作建议模块会依据算法处理结果以及专家经验等给出当前工况下的操作指导。



图 11. 旋流器监控界面



### （六）质量预测界面

质量预测界面包含有数据选择、模型选择、指标选择等功能，并提供训练结果信息展示，给操作人员调整关键质量变量预测的算法实现细节。操作人员可以选择预测模式（单步预测/多步预测）、算法模型（RF、SAE、LSTM、PCR 等）以及训练数据（单模态数据/多模态数据，训练数据的时间范围）。在此还可以展示用户选择的数据的变化趋势，以帮助用户更清晰的设置模型训练参数。在模型训练界面中，用户可个性化的设定模型重要超参数值并实施训练，而后系统会自动展示当前超参数下的模型训练结果、预测曲线与真实曲线的对比结果等，具体界面如图 12 所示。



图 12. 质量预测界面

### （七）操作优化界面

操作优化界面包含关键变量的预测值与真实值对比曲线、优化模式设定、优化结果展示、重要操作参数建议设定值展示以及操作建议显示，具体界面如图 13 所示。根据当前预测信息进行优化操作时，用户首先需要在优化模式设定区域选择优化目标（能耗最小、产量最大化）以及优化方法（自动设定或手动设定）。选择自动设定后，系统会根据相应的优化算法给出各操作变量的最优设定值，用户也可根据经验修改设定值。同时，系统也会自动展示对于当前工况下的操作指导建议。



图 13. 操作优化界面

## 3.3 系统应用效果

所开发的智能生产管控系统于 2023 年 4 月-6 月试运行期间取得了如下功能和成效包括：

1) 针对盐湖化工生产过程中存在多产品质量指标检测困难、分析化验检测频率低以及数据响应时间大滞后等诸多问题，基于工业大数据解析技术，实现了精选氯化钾滤饼、软钾滤饼、混合钾、E2 母液等

多个产品中钠离子、钾离子、镁离子、硫酸根离子、氯离子、水含量等 20 余个成分含量质量指标的在线预测，所建立的预测模型综合可解释各产品质量指标变化的 80.8%。

2) 针对盐湖化工浮选工序运行工况类型多、变化频繁，导致浮选工序工作状态判别困难等问题，提出了一种融合浮选泡沫音视频多模态信息的工况识别方法，实现了对浮选工序多类型工况快速准确识别，工况识别综合准确率达到 87.9%，为后续浮选流程操作优化与生产全流程管控等提供了重要依据。

3) 针对盐湖化工硫酸钾结晶旋流器出料口背景杂乱，出料状况波动频繁复杂，导致旋流器处需频繁巡检，工况判别困难、工人调整主观性强等问题，基于机器视觉和智能优化技术，提出了一种旋流器出料工况判别和操作指导方法，实现了旋流器多类型状态快速准确评估、并提供生产操作指导意见，运行状态评估准确率达 85%，可减少工人 50% 巡检时间，劣质工况处理响应时间可缩减至 10 分钟内，中控、现场协作效率提升 10%。

4) 针对生产过程流程长、工序间关联耦合复杂、生产物料调度频繁、操作变量繁多、人工最优操作参数设定难导致产品质量指标波动、工序间协作效率低、生产能耗高等问题，提出了盐湖化工过程多工序协同生产调度与操作优化方法，实现了多工序间调度计划和产品质量控制指标最优设定、工序内操作参数快速优化与再调整，系统上线后产品质量指标综合提升 3.8%，工序间协作效率提升 14% 以上，水、电、气以及钾混盐和光卤石等矿物原料生产单耗分别降低 4.8%、1.0%、12.5%、9.5% 和 8.3%。

综上所述，本文开发的盐湖化工生产管控一体化系统极大提高了盐湖化工过程的控制精细度，对生产过程提质增效具有重要意义。

## 4 结论

盐湖资源开发涉及国家粮食安全，但目前采用的控制方式相对粗放，未能充分发挥盐湖资源的潜力。因此，本研究开发了一种基于云边端协同架构的盐湖化工过程生产管控一体化系统。该系统能够协同优化管理并监控原料采收、浮选、结晶等关键工序。目前，该系统部署在一家西部大型盐湖化工企业的硫酸钾生产线试运

行, 运行结果显示此系统可以在一定程度上改善产品质量, 减少资源消耗(如水、电、气等), 工序间的协同控制方式也降低了操作响应时间, 提高了工序之间的协同优化效率。未来, 我们将进一步完善此系统, 并将其推广至新疆、青海等其他盐湖企业, 促进盐湖化工产业转型升级。

## 参考文献

- [1] 吴维民. 盐湖化学与化工的现状与发展对策研究 [J]. 工程研究与实用, 2022, 3(15): 214-216.
- [2] 秦兆明. 罗布泊盐湖卤水制取软钾镁矾技术工艺研究 [J]. 现代盐化工, 2016, (01): 27-29.
- [3] 阳春华, 孙备, 李勇刚, 等. 复杂生产流程协同优化与智能控制 [J]. 自动化学报, 2023, 49(03): 528-539.
- [4] 丁进良, 杨翠娥, 陈远东, 等. 复杂工业过程智能优化决策系统的现状与展望 [J]. 自动化学报, 2018, 44(11): 1931-1943.
- [5] 柴天佑, 刘强, 丁进良, 等. 工业互联网驱动的流程工业智能优化制造新模式研究展望 [J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(01): 14-25.
- [6] LIU D, WANG Y, LIU C, et al. Data Mode Related Interpretable Transformer Network for Predictive Modeling and Key Sample Analysis in Industrial Processes [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(9): 9325-9336.
- [7] LIU C, WANG K, WANG Y, et al. Learning deep multi-manifold structure feature representation for quality prediction with an industrial application [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(9): 5849-5858.
- [8] 李守江. 罗布泊硫酸盐型盐湖钾盐浮选的理论及工艺研究 [D]; 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [9] 陶永, 蒋昕昊, 刘默, 等. 智能制造和工业互联网融合发展初探 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(04): 24-33.
- [10] 阳春华, 刘一顺, 黄科科, 等. 有色金属工业智能模型库构建方法及应用 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(04): 188-201.
- [11] LIU D, WANG Y, LIU C, et al. Blackout Missing Data Recovery in Industrial Time Series Based on Masked-Former Hierarchical Imputation Framework [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2023: 1-13.
- [12] 邵珠峰, 赵云, 王晨, 等. 新时期我国工业软件产业发展路径研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(02): 86-95.
- [13] SUN B, DAI J, HUANG K, et al. Smart manufacturing of nonferrous metallurgical processes: Review and perspectives [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022, 29(4): 611-625.
- [14] HUANG K, TAO Z, WANG C, et al. Cloud-edge collaborative method for industrial process monitoring based on error-triggered dictionary learning [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(12): 8957-8966.
- [15] 王昊, 李龙, 黄冬朋, 等. 工业监控软件分布式服务框架的设计与实现 [J]. 仪器仪表标准化与计量, 2015, (06): 32-36.
- [16] 郑绵平, 张永生, 刘喜方, 等. 中国盐湖科学技术研究的若干进展与展望 [J]. 地质学报, 2016, 90(09): 2123-2166.
- [17] 李康. 罗布泊盐湖卤水提取硫酸钾技术工艺解析 [J]. 化工管理, 2016, (29): 260.