

地浸采铀数据管理与智能分析系统研发与应用

王晓伟¹, 刘志锋^{2*}, 周义朋², 张传飞¹, 周意如¹

1. 中核内蒙古矿业有限公, 内蒙古 呼和浩特 010000

2. 东华理工大学, 江西 南昌 330013

DOI: 10.61369/TACS.2026040017

摘 要 : 针对地浸采铀矿山生产过程中海量数据形成的“数据孤岛”与“数据沉睡”问题, 本文依托内蒙古巴彦乌拉铀矿山, 研建了一套地浸采铀数据仓库管理系统及采区运行分析系统。系统采用分层架构设计, 整合矿床、矿段、采区、钻孔及水冶厂等多源异构数据, 构建了包含基础信息、生产运行、工艺监测等八大功能模块的数据管理平台。同时, 开发了矿床-采区-单元三级可视化快速诊断系统, 集成等值线图、气泡图、曲线图等多种动态展示形式, 支持基于 IDW 和 Kriging 插值算法的等值线动态绘制。系统已在内蒙古巴彦乌拉铀矿山成功应用, 显著提升了地浸采铀数据管理水平与生产决策支持能力。

关 键 词 : 地浸采铀; 可视化系统; 快速诊断; 智能分析

Research and Application of Data Management and Intelligent Analysis System for In-Situ Leaching Uranium Mining

Wang Xiaowei¹, Liu Zhifeng^{2*}, Zhou Yipeng², Zhang Chuanfei¹, Zhou Yiru¹

1. CNNC Inner Mongolia Mining Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 010000

2. East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013

Abstract : Aiming at the problems of "data silos" and "data sleeping" caused by massive data in the production process of in-situ leaching uranium mines, this paper relies on the Bayan Wula Uranium Mine in Inner Mongolia to develop and construct a set of data warehouse management system and mining area operation analysis system for in-situ leaching uranium mining. The system adopts a hierarchical architecture design, integrates multi-source heterogeneous data including deposits, ore blocks, mining areas, boreholes and hydrometallurgical plants, and builds a data management platform containing eight functional modules such as basic information, production operation and process monitoring. At the same time, a three-level visual rapid diagnosis system of deposit-mining area-unit is developed, which integrates a variety of dynamic display forms such as contour maps, bubble charts and curve graphs, and supports the dynamic drawing of contour maps based on IDW and Kriging interpolation algorithms. The system has been successfully applied in the Bayan Wula Uranium Mine in Inner Mongolia, which significantly improves the data management level and production decision support capacity of in-situ leaching uranium mining.

Keywords : in-situ leaching uranium mining; visualization system; rapid diagnosis; intelligent analysis

引言

核电的主要燃料铀, 作为国家重大战略物资, 影响着我国能源战略发展^[1]。我国目前以砂岩型铀矿开发为主, 主要采用地浸采铀技术, 该技术被誉为世界地质矿产业的重大技术革命, 具有基建投资省、建设周期短、生产成本低、资源利用率高、环境友好等优点^[2-3]。“十四五”期间, 中国铀业在内蒙古积极实施两个千吨级铀矿大基地建设, 亟需以数字化和智能化为标志的第四代铀矿采冶技术支撑产业升级。

内蒙古是“十四五”天然铀生产的主战场, 巴彦乌拉地浸铀矿山建成于2014年。受地质条件等因素制约, 该矿山投产以来各采区浸出液铀浓度普遍偏低, 采取传统技术措施效果不明显^[4-5]。基于较完善的信息化基础, 对采区全流程数据进行系统整合分析, 实施井场精益化调控, 成为提高浸采效率的新方向。

目前, 在铀矿山地浸采铀数字化研究方面, 综合各类数据的数据仓库尚未建设, 基于地浸大数据进行智能分析的方法体系尚未形

* 通讯作者: 刘志锋, Email: zfliu@ecut.edu.cn

成,砂岩铀矿地浸采冶注/抽液影响分析决策系统有待研发^[6-7]。捷克 DIAMO 公司采用自主研发的 GTIS 软件实现了地下水监测数据、钻孔信息等的处理与显示,并采用 MODFLOW 软件建立地下水运移数字模型进行退役治理评估^[8]。国内铀采冶自动化程度虽有提高,但在数据仓库建设、大数据分析、智能决策等方面仍有很多工作需要建设和改进^[9-10]。

为此,本文依托中核内蒙古矿业有限公司与东华理工大学联合项目,以巴彦乌拉铀矿山为基地,针对地浸采区的“数据孤岛”与“数据沉睡”问题,开展数据仓库研建,建立地浸采区运行快速分析方法,研发基于机器学习的智能分析决策技术,最终实现对海量地浸数据的智能分析和价值挖掘。

一、系统总体设计

(一) 系统需求分析

本系统主要针对砂岩型铀矿信息化工作需要,唤醒多年积累的“沉睡”数据,首先需要对数据进行高效管理,实现数据的收集、清洗、查询和管理等,将前期生产积累的各种存储格式数据,利用信息化技术存入数据仓库,以便统一管理和应用[31-33]。

(二) 系统架构设计

系统的架构设计采用了分层架构(图1),每个层次都有明确的职责和功能,有利于降低系统的耦合度,提高可维护性和可扩展性。主要分为访问层、表现层、中间层、应用层和数据层。

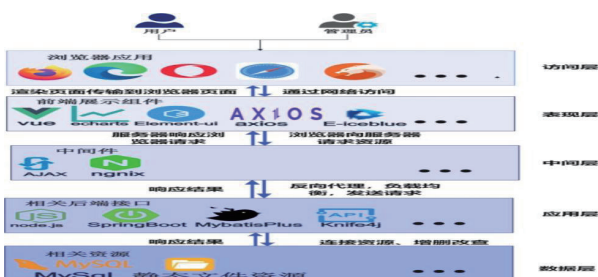


图1 系统设计架构图

系统以内蒙古巴彦乌拉砂岩铀矿地浸采铀生产数据为基础,所有结构设计按照实际工作人员的日常工作进行逻辑设计。在实际铀矿开采中按照矿床、矿段、采区、钻孔、水冶厂的包含逻辑关系,系统基础信息菜单中的矿床、矿段、采区、钻孔、水冶厂、工序即体现其分级逻辑。

系统采用 B/S 架构开发数据管理系统,负责外部数据的入库操作,包括:管理员登陆、数据新增录入、数据检查修正、数据删除、数据自动存储(例如地浸抽注量)等。

二、系统功能模块设计

根据地浸采铀井场实际情况,系统功能细化为八个模块:基础信息模块、生产运行模块、工艺监测模块、原材料模块、产品统计模块、设备管理模块、安全环保模块和报表系统模块。

(1) 基础信息模块:包括矿床、矿段、采区、钻孔、水冶厂基础信息的管理,支持数据查询、导入、插入、删除及数据库同步。

(2) 生产运行模块:涵盖采区、钻孔、塔组设备、塔设备、槽设备、气体站、集液池、配液池的生产运行数据管理,支持日

期查询、数据修改和分类筛选。

(3) 工艺监测模块:包含采区(单日/周期)、钻孔单元(周期)、吸附淋洗(单日)、萃取反萃取(单日)、沉淀(单日)、树脂杂项(周期)、树脂再生(周期)等工艺数据的综合管理。

(4) 原材料模块:管理大宗分析检测、大宗消耗统计、燃动消耗统计、萃取剂配制、树脂性能等数据。

(5) 产品统计模块:包括产品和产品称重数据的管理。

(6) 设备管理模块:管理井场设备、塔组、单塔、槽、配液池、集液池等基础信息。

(7) 安全环保模块:涵盖周边环境、地下水、固体废物、蒸发池、工作场所辐射防护、个人剂量、运输载体辐射防护等数据。

(8) 报表系统模块:提供采区生产运行报表、采区洗井提泵情况统计表、铀浓度浸出液量对比统计表、生产参数月报表、生产日统计报表、抽/注液孔水量记录表等,支持报表编辑和导出。

三、系统开发关键技术

(一) 数据库技术

系统采用 MySQL 进行数据存储和管理,MySQL 是一个成熟可靠的关系型数据库,具有高性能、高可靠性和强扩展性等特点。在数据表的设计方面加入了索引,显著提升了数据查询和操作的效率。

(二) 前端开发技术

系统的前端采用 vue 框架进行开发,该框架具有高效、简洁和灵活的特点,通过组件化的开发方式,将功能模块进行精细化拆分,提高代码的可读性和可维护性。系统使用 vue-router 实现路由,实现页面的刷新跳转和前端路由管理。同时使用 Element UI 组件库,快速构建美观且响应迅速的用户界面。

(三) 后端开发技术

系统的后端采用 node.js 构建轻量级的网络应用程序,提供中间层的请求接口。使用 SpringBoot 框架构建 Java 后端应用程序,该框架具有自动配置和起步依赖等特点,内嵌 servlet 容器,提高了开发和部署效率。系统结合 MyBatis-Plus 组件,提供通用的 CRUD 操作,简化与数据库的交互。使用 Knife4j 生成详细的 API 文档,方便开发人员查阅和调试。结合 E-iceblue 组件实现 Word 和 Excel 表格模板的创建和修改。

(四) 可视化技术

Echarts: ECharts 是一个由百度开发的基于 JavaScript 的数

据可视化库, 提供了丰富的图表类型和交互功能。本系统采用前端 vue 框架下的 Echarts 绘制矿区下各个生产指标的曲线以及各数据之间的贡献率等。

Plotly.js: Plotly.js 是一个基于 JavaScript 的开源图表库, 提供了丰富的图表类型和交互功能。由于本系统需要绘制采区下各个单元的等值线图, 故采用 Plotly.js 图表库, 在其基础上开发绘制了等值线图与气泡图的叠加图。

等值线图绘制算法: (1) IDW 插值算法: 基于现有数据点之间的空间距离和数据值之间的权重关系, 对未知位置的数据进行估计。距离越近的数据点权重越大。(2) Kriging 插值算法: 通过变异函数模型, 求得满足无偏估计和估计方差最小条件下的最优权重系数, 对未知点进行估计。相比反距离插值, 克里金插值具有更高的精度。

四、系统应用成果

系统在内蒙古巴彦乌拉矿山成功应用, 取得了以下成果:

(1) 集成化数据管理: 将内蒙古巴彦乌拉砂岩铀矿地浸采铀生产数据整合到一个系统中, 实现了数据的集中管理和统一访问, 提高了数据的可用性和准确性。

(2) 快速智能分析及可视化系统: 基于数据仓库实现了快速分析和可视化功能, 用户可通过系统快速获取所需信息, 并通过可视化图表直观理解数据含义和趋势。

(3) 生产决策支持: 通过快速智能分析系统及时发现生产异常, 帮助管理人员采取相应措施, 提高生产效率; 大屏展示系统

实现矿山生产数据的实时监测, 为决策提供准确及时的支持。



图2 系统应用效果图

五、结论

本文依托巴彦乌拉拉铀矿山, 成功研建了一套地浸采铀数据仓库管理系统及采区运行分析系统。系统采用分层架构设计, 整合矿床、矿段、采区、钻孔及水冶厂等多源异构数据, 构建了包含八大功能模块的数据管理平台。研建了数据管理系统, 实现了亿级数据的秒级响应, 1000万条记录查询单条响应时间为0.023秒, 1亿条记录查询单条响应时间为0.032秒; 开发了矿床-采区-单元三级可视化快速智能分析系统, 集成等值线图、气泡图、曲线图等多种动态展示形式, 支持基于IDW和Kriging插值算法的等值线动态绘制。系统已在内蒙古巴彦乌拉拉铀矿山成功应用, 显著提升了地浸采铀数据管理水平与生产决策支持能力。本研究成果为地浸铀矿山的数字化、智能化转型提供了技术支撑和实践经验, 对我国天然铀产业的升级发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 赵琛, 王一帆, 李思颖, 陶泽勇. 中国未来核电发展趋势与关键技术 [J]. 能源与节能, 2020(11): 46-49+67.
- [2] 朱鹏, 陈建昌, 尉小龙等. 砂岩型铀矿床地浸采铀工艺方法概述 [J]. 采矿技术, 2011, 11(04): 4-6.
- [3] 李孝君. 地浸采铀方法研究及展望 [J]. 绿色科技, 2018, (3): 54-56.
- [4] 潘宏峰, 刘成东, 万建军, 赵严. 内蒙古巴彦乌拉拉铀矿床地质特征 [J]. 中国金属通报, 2021(04): 116-117.
- [5] 何挺, 刘金辉, 阳奕汉, 姚光怀, 邢拥国, 胡鹏飞, 王如意, 梁大业, 王晓伟, 张锋. 内蒙古巴彦乌拉拉铀矿地浸采区地下水示踪试验 [J]. 有色金属 (冶炼部分), 2021(10): 50-57.
- [6] 吴冬, 包峰, 程文娟, 顾红超, 陈波, 张栋栋. 数字铀矿山技术研究进展与展望 [J]. 铀矿冶, 2017, 36(S1): 1-6.
- [7] 李喜龙. 内蒙古某铀矿数字化矿山建设的思考 [C]. 中国核科学技术进展报告 (第六卷)——中国核学会2019年学术年会论文集第2册 (铀矿地质分卷 (下)、铀矿冶分卷), 2019: 231-236.
- [8] Hähne, R., Schöpe, M., Paul, M., Slezak, J. (2002). Water balance and hydrogeological modeling in the case of the TPF Rozna/ Czech Republic. In: Merkel, B.J., Planer-Friedrich, B., Wolkersdorfer, C. (eds) Uranium in the Aquatic Environment. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [9] 苏学斌, 杜志明. 我国地浸采铀工艺技术发展现状与展望 [J]. 中国矿业, 2012, 21(9): 79-83.
- [10] 中国核能行业协会. (2020). 数字化转型面临的问题分析. 载于《中国核能发展报告 (2020)》.