核工程放射性废物全生命周期数字化管控技术研究

薛晓飞 徐晨阳 罗仁东
中核陕西铀浓缩有限公司 陕西 汉中 723312

摘 要 核工程放射性废物种类繁多、来源复杂，传统分环节管理方式已难以满足全过程信息连续记录、动态追溯的要求。本文构建全生命周期数字化管控体系，依靠构建全过程数据采集体系、全生命周期数据库以及多层级数字化管控平台来实现废物信息的统一汇聚与关联管理。在此基础上，对分类识别、信息追踪、过程参数监测、包装质量检测、贮存状态监测以及最后的处置信息关联等技术进行研究，为提高放射性废物全过程管控的精度提供技术支持。

关键词 核工程；放射性废物；全生命周期；数字化管控

Research on Full Lifecycle Digital Management and Control Technology for Radioactive Waste in Nuclear Engineering

Xue Xiaofei, Xu Chenyang, Luo Rendong
China National Nuclear Corporation Shaanxi Uranium Enrichment Co., Ltd., Hanzhong 723312, Shaanxi Province, China

Abstract Radioactive waste from nuclear engineering encompasses a wide variety of types and complex sources, and the traditional management approach based on separate stages can no longer meet the requirements for continuous information recording and dynamic traceability throughout the entire process. This paper constructs a full-life-cycle digital management and control system, which relies on the establishment of a whole-process data acquisition system, a full-life-cycle database, and a multi-level digital management and control platform to achieve unified aggregation and correlated management of waste information. On this basis, technologies such as classification and identification, information tracking, process parameter monitoring, packaging quality inspection, storage status monitoring, and final disposal information correlation are investigated, providing technical support for improving the precision of whole-process management and control of radioactive waste.

Key words Nuclear Engineering; Radioactive Waste; Full Lifecycle; Digital Management and Control

由于核工程的规模越来越大，在运行维护、检修、退役等各个环节所产生的放射性废物的数量及种类也越来越多，放射性废物的管理过程包括产生、处理、贮存直至最终处置。数字化技术依靠感知终端、统一数据库和管控平台来构建废物的数字身份，从而实现各个业务环节之间数据的互通、状态的监测以及全过程的追踪。基于此，构建面向放射性废物全生命周期的数字化管控体系，探究各个关键环节的数字化技术，为核工程放射性废物精细化管理奠定技术根基。

1 放射性废物全生命周期数字化管控体系架构

1.1 建立全过程数据采集体系

核工程放射性废物全过程数据采集体系要包含废物产生、分类、收集、暂存、处理、包装、贮存和处置等重要环节，用唯一的编码作为数据关联的主线。采用辐射监测仪、电子秤、温湿度传感器、气体探测器、射频识别（radio frequency identification，RFID）和视频设备对核素种类、活度、剂量率、质量、环境参数和位置状态进行自动采集，作业终端补充责任人员、处理工艺和流转信息。采集到的数据经过边缘网关的时间同步、异常值筛选、格式转换后，再上传至数据库，设置数据校验、断点续传、缺失补录等机制，保证各个环节的数据可以连续衔接，为废物状态监控、风险预警以及全过程追溯提供可靠的依据。表1为放射性废物全过程数据采集参数配置。

表1 放射性废物全过程数据采集参数配置

采集环节	主要采集参数	采集方式	采集频率
废物产生	来源、核素类型、初始质量	作业终端＋电子秤	单批次 1 次
分类收集	废物类别、剂量率、表面污染	辐射监测仪 +RFID	每件 1 次
处理过程	温度、压力、处理时间	在线传感器	10 s/ 次
包装检测	包件质量、表面剂量率	称重装置＋剂量仪	每包 1 次
贮存阶段	温度、湿度、辐射剂量率	环境传感器	60 s/ 次
最终处置	处置位置、入库时间、包件编码	RFID+ 定位终端	每次作业 1 次

1.2 建设全生命周期管控数据库

以废物唯一的身份编码为基础，建立包含产生、分类、收集、暂存、处理、包装、贮存和最终处置在内的统一的数

据模型，将核素组成、活度、剂量率、质量、处理参数、包装状态、贮存位置以及流转记录等按照标准字段集中保存。数据库分为基础信息库、过程监测库、追溯信息库和预警规则库四个层次，用时间戳和废物编码建立跨环节的联系，设置数据校验、版本控制、权限分级、日志审计和备份恢复等措施，保证历史数据的连续保存和动态更新，给状态查询、生命周期追踪和风险分析提供完整的数据支持。数据库数据完整率可表示为：

$$C_d = \frac{N_v}{N_t} \times 100\% \quad (1)$$

式中，C_d—数据完整率；N_v—字段完整且通过校验的有效数据记录数量；N_t—同期应采集的数据记录总数量[1]。

1.3 构建多层级数字化管控平台

采用分层解耦结构将现场感知、数据存储、平台服务、业务应用和用户访问连接成一条纵向链路。感知采集层安装辐射监测仪、二维码/RFID、视频监控、温湿度传感器、称重检测装置、手持终端等设备，实时采集废物属性、环境状态、位置变化等信息；数据层将基础信息、过程监测、追溯档案、预警规则进行分类存储，并用统一编码建立数据关联；平台支撑层包含业务流程引擎、数据交换接口、权限管理、日志审计以及模型分析等功能模块，对异构数据进行转换、调度、控制访问。在此基础上应用层集成分类识别、收集暂存追踪、处理监控、包装检测、贮存监测、处置信息关联和统计预警等功能，用户层分别给监管部门、核设施运营单位、处理处置机构和管理人员提供分级访问权限[2]。图1为放射性废物多层级数字化管控平台框架。

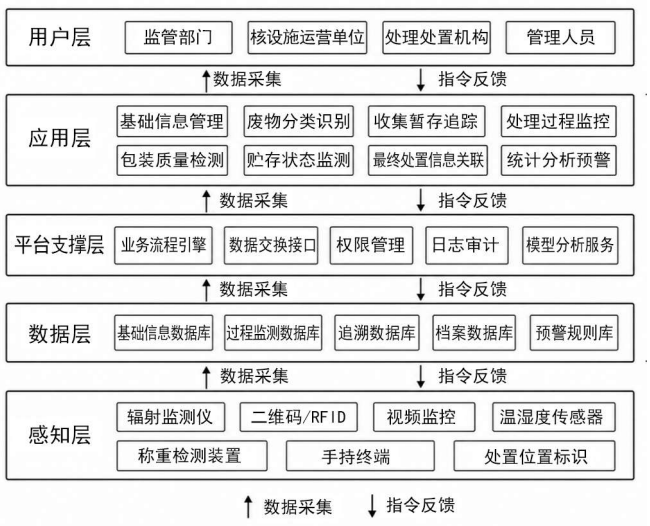


图1 放射性废物多层级数字化管控平台框架

2 核工程放射性废物全生命周期数字化管控关键技术

2.1 废物分类识别数字化技术

以废物来源、物理形态、核素组成、比活度、表面剂量率、可燃性等特征参数为基础，建立标准化特征字段和分类规则库。现场利用辐射监测仪、称重设备、RFID终端对废物的属性进行自动采集，经过数据清洗、特征编码、阈值判定后得到分类标签，并将分类标签与唯一的身份编码绑定。对多参数共同作用的分类场景可以采用加权综合判别法来计算废物的分类指数，根据指数区间的范围自动判断出对应的类别，并将识别的结果写入生命周期数据库中，给后续收集、处理、包装、贮存以及最终处置提供统一的分类标准。分类判别指数可表示为：

$$I_c = \sum_{i=1}^{n} w_i x_i \quad (2)$$

式中，I_c—废物分类判别指数；x_i—第i项标准化特征参数；w_i—对应权重，且$\sum_{i=1}^{n} w_i=1$；n—参与判别的特征参数数量。

2.2 废物收集暂存信息追踪技术

以唯一编码为线索，将废物产生点、收集容器、转运批次、暂存库位联系起来。现场使用RFID对废物编号、质量、剂量率、收集时间、责任人员、暂存位置进行登记，在转运节点自动更新流转状态。暂存区设置固定式读写器、辐射监测仪、称重终端，对废物包入库、移位、复核、出库全过程实行时间戳记录，并将位置坐标、环境参数、异常状态一同传送到数据库。系统利用编码一致性校验以及轨迹比对来判定错放、漏扫和超期暂存等状况，从而实现废物来源、流转路径以及当前库位的持续追踪，给后续处理、包装和处置环节提供正确的追溯信息。表2为放射性废物收集暂存信息追踪参数。

表2 放射性废物收集暂存信息追踪参数

追踪项目	数值参数	采集周期	预警阈值	数据记录量
RFID 识别距离	5 m	2 s/ 次	< 1 m	1 800 条 /h
废物包称重	500 kg	每包 1 次	± 2 kg	1 条 / 包
表面剂量率	2.5 μSv/h	10 s/ 次	5.0 μSv/h	360 条 /h
暂存区温度	23 ℃	60 s/ 次	30 ℃	60 条 /h
暂存区湿度	55% RH	60 s/ 次	70% RH	60 条 /h
库位识别精度	0.5 m	5 s/ 次	1.0 m	720 条 /h
暂存时长	72 h	1 h/ 次	168 h	24 条 /d

2.3 废物处理过程参数监控技术

设置压缩、焚烧、固化和去污等工艺的在线监测节点，对温度、压力、流量、处理时间、设备负荷、辐射剂量率和废物质量进行连续监测。传感数据经过边缘控制器进行滤波、时间同步、异常值校验后，立即传送到管控平台，和废物唯一的编码、处理批次、设备编号等信息相联系。系统按照工艺允许的

区间来开展动态比较，当参数偏离设定范围时就会发出分级报警并记下异常持续的时间，为设备调节、工艺改善以及处理质量追溯提供数据支撑。处理过程综合偏差指数可表示为：

$$D_p=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{x_i-x_{i0}}{\Delta x_i}\right)^2} \quad (3)$$

式中，D_p—综合偏差指数；x_i—第i项实时参数；x_{i0}—对应设定值；Δx_i—允许偏差范围；n—监控参数数量[3]。

2.4 废物包装质量数字检测技术

废物固化、压实后，用RFID读取唯一的身份编码，关联废物的类别、核素组成、处理批次、包装容器型号，用电子称重装置采集总质量、净质量，用尺寸检测设备核验包装外形和变形量。在包装表面设置剂量率、表面污染检测点，对不同的方位进行扫描测量，检测数据按照空间位置一起存入数字档案中；对于桶体、箱体和封盖部位，可以利用机器视觉、超声检测、泄漏检测设备来识别出裂纹、腐蚀、凹陷、密封失效等缺陷。平台将实测数据与对应包装类型的质量控制阈值进行比较，对于超限的参数就会产生异常标识，再关联检测时间、设备编号、操作人员以及处置结果。

2.5 废物贮存状态智能监测技术

以废物包唯一编码和库位信息为依托，在贮存库内部设置辐射剂量率、温湿度、气体、液位、称重、门禁和视频监控装置，利用物联网感知系统对废物包的状态以及贮存环境的参数进行持续监测。监测数据经过边缘终端滤波、时间同步、异常值校验后上传到监测中心，再经由数据交换接口同入库登记、编码建档、分区存放等信息相联结，从而实现废物包位置、质量变动、辐射水平以及环境状况的同步更新。图2为核工程放射性废物贮存状态智能监测系统示意图。

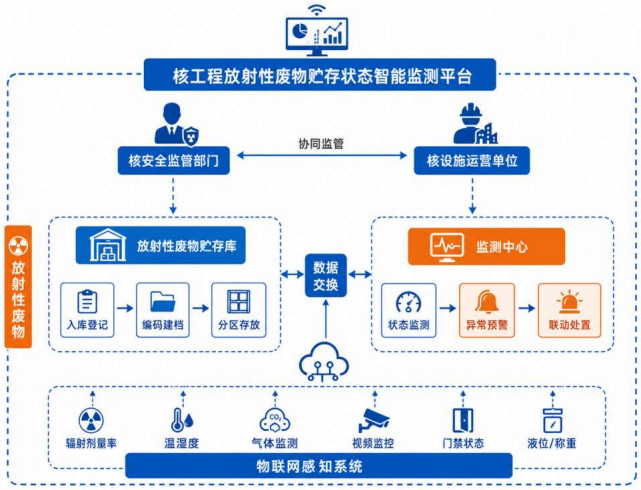


图2 核工程放射性废物贮存状态智能监测系统示意图

平台对各个监测参数设置分级阈值，用趋势分析来发现剂量率异常升高、温湿度超标、气体浓度异常、废物包质量变化以及非法门禁等状况，发出异常警报后会自动关联到对应的库位、废物编码和视频画面，并将处置信息反馈给核设施运营单位以及核安全监管机构，从而创建“状态监测、异常预警、联动处置、结果记载”的闭环监测体系[4]。

2.6 废物最终处置信息关联技术

废物包进入处置设施前，用RFID读取身份编码，自动调取核素组成、活度水平、表面剂量率、包装类型、处理批次和贮存记录，再与接收检验结果做一致性校验。在处置作业过程中，利用定位终端、库位编码、空间坐标系统记录废物包进入时间、处置区域、单元编号、层位坐标、操作人员信息，将处置位置和数字档案永久绑定。平台使用主键关联、时间戳校验、状态锁定等手段来防止同一个废物包重复登记，对处置后的废物信息设置只读归档状态并同步保存检测报告、影像资料、交接记录和异常处置记录[5]。

3 结束语

综上所述，核工程放射性废物全生命周期数字化管控以数据连续性、信息关联性、过程可追溯性为原则，用全过程数据采集、全生命周期数据库和多层级管控平台的建设来形成废物产生到最终处置的统一数字化管理链路。将分类识别、收集暂存追踪、处理参数监控、包装质量检测、贮存状态监测、处置信息关联等技术有机地结合，可以使废物信息记录更加完整，也能使过程状态的识别能力得到加强，从而达到废物来源、处理过程、流转位置、最终去向的闭环跟踪目的。

参考文献

[1]杨晨辉.核化工企业生产安全管控及放射性废物处置优化的经济性[J].中国化工贸易,2026,18(20):52-54.

[2]刘兴伟,吕涛,夏加国,等.基于偏随机键遗传算法的放射性废物处置优化算法研究[J].核技术,2026,49(6):185-196.

[3]苏海燕,刘兴华,姚振宇.放射性废物管理信息化的探讨与实践[J].中国信息界,2026(5):30-32.

[4]刘晓超,曹凤波,徐乐昌,等.中国铀矿冶放射性废物管理战略研究[J].铀矿冶,2024,43(4):72-75,111.

[5]梁建华.放射性废物的来源及其安全管理[J].黑龙江科学,2021,12(2):134-135.

（本文编辑 曹 阳）