

反应堆退役数据系统的研究与实现

樊英武, 但贵萍, 黄 坡, 陈 师*, 张鹏昊, 何艳荣

中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳

收稿日期: 2023年7月25日; 录用日期: 2023年8月8日; 发布日期: 2023年10月8日

摘 要

反应堆在建造、运行、关闭等各阶段会产生数量庞大的立项文件、运行记录以及设备仪器参数等相关技术文件, 这些文件既是核反应堆退役方案确定的重要依据, 也是核反应堆技术持续发展的重要基础, 是我国核工业的宝贵资料, 应当妥善保管。但由于早期大多以手写或单独建档的方式保存反应堆建造、运行等相关文件, 文件易丢失且难以得到高效利用。随着计算机技术的普及与应用, 以及我国核反应堆退役陆续提上日程, 核反应堆全生命周期数据的数字化成为目前核工业界的研究热点。为了更好地管理反应堆相关数据, 为反应堆退役提供重要的源项以及历史数据, 同时为今后我国核反应堆的建造、退役保留有价值的参考资料, 本研究开发了反应堆退役数据库系统, 可实现反应堆从建造、运行至退役的文件、数据管理, 为用户提供友好的管理界面, 为反应堆数据库有效管理及利用提供便利。

关键词

反应堆退役, 全生命周期, 数据系统, 知识可视化

Research and Implementation of Reactor Decommissioning Data System

Yingwu Fan, Guiping Dan, Po Huang, Shi Chen*, Penghao Zhang, Yanrong He

Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan

Received: Jul. 25th, 2023; accepted: Aug. 8th, 2023; published: Oct. 8th, 2023

Abstract

A large number of project documents, operation records, equipment and instrument parameters and other related technical documents will be produced in various stages of reactor construction, operation and shutdown. These documents are significant not only for deciding nuclear reactor de-

*通讯作者。

commissioning plans, but also for the long-term development of nuclear reactor technology. They are valuable materials for China's nuclear industry and should be safeguarded. However, since most of the early documents related to reactor construction and operation are saved in handwritten or separate files, the files are easy to lose and difficult to be used efficiently. With the popularization and application of computer technology and the decommissioning of nuclear reactors in China, the digitization of nuclear reactor full life cycle data has become a research hotspot in the nuclear industry. This study developed a reactor decommissioning database system, which can realize the file and data management of reactor from construction, operation, and decommissioning, provide users with a friendly management interface, and facilitate reactor decommissioning. These goals included better managing reactor-related data, providing significant source terms and historical data for reactor decommissioning, and retaining valuable reference materials for future nuclear reactor construction and decommissioning in China.

Keywords

Reactor Decommissioning, Full Life Cycle, Data System, Knowledge Visualization

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

任何一座反应堆都有其生命周期, 需要经历立项、预研、审批、设计、确认、启动、开工、实施、测试、竣工、试用、运营、关闭、退役等流程(见图 1), 从而产生大量的数据以及文件[1] [2] [3]。反应堆建造及运行数据是确定反应堆退役源项的重要数据, 也是确定反应堆退役策略及方案的重要依据, 未来更有可能为领域发展提供重要参考, 是我国核工业发展宝贵的历史资料, 需要妥善保管[4]。但早期的数据记录多以表格手写录入的方式进行, 受限于当时的经验和技術, 早期建立的核电站的相关资料难以完整地保存, 且大量累积的文件也面临着文档管理混乱等一系列问题, 这大大增加了我国反应堆退役工程的难度[5]。

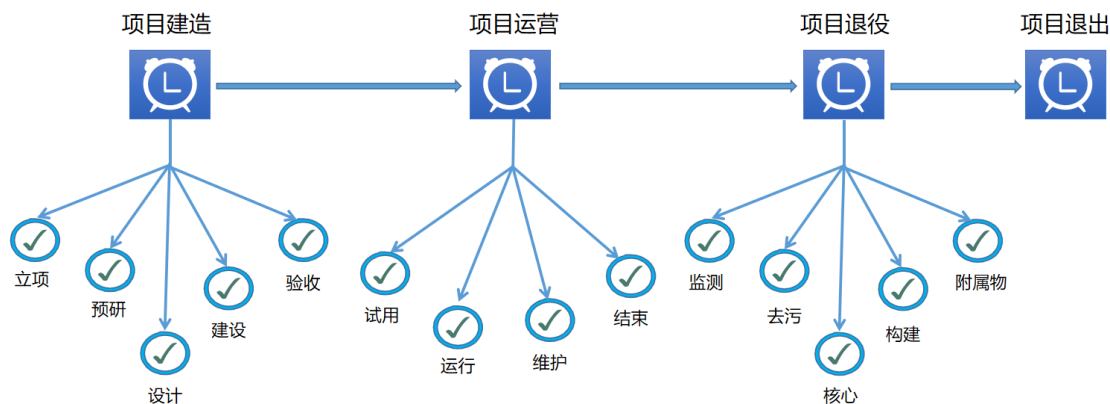


Figure 1. Schematic diagram of the full life cycle of the reactor

图 1. 反应堆全生命周期示意图

计算机技术的普及与应用为数字化反应堆的发展提供了必要条件[6] [7]。在核设施退役方面, 国际上

一些国家,如日本、德国、意大利等已先后开发了适用于本国相关核设施退役数据管理系统。例如:1996年,日本应用其自主开发的电脑辅助系统(COSMARD)进行了日本动力示范堆(JPDR)的退役作业和仿真远距离拆除任务;后续又开发出退役解体工程支持系统(DEXUS)并应用于普贤核电站退役项目[8][9];德国也于1995年开发了退役废物跟踪和管理系统(ReVK),该系统在欧洲多国得到使用[10];意大利开发的集成退役管理工具(IDMT),涵盖了退役政策、经济性选择以及辐射最优化等多种功能。

我国在反应堆退役方面起步较晚,20世纪90年代我国部分核设施才陆续进入关停与退役阶段,部分微堆、小型堆及军用研究堆等已完成退役,但大规模商用堆仍未开始退役[11][12]。我国在核设施全周期数据、文档管理方面也较为落后,很多过程数据仍以手写记录为主,工作量大、效率低、管理和查阅不便,难以有效利用,也难以满足当下反应堆数字化的需求[5][13]。近年来,我国在反应堆退役系统方面也做了相关工作,如中国原子能科学研究院[14]设计了核设施退役三废(废物、废液、废气)信息跟踪与管理系统,可实现对三废的数据管理功能;哈尔滨工程大学[13][15]开发的核设施退役信息数据库可实现照片、图纸等信息的录入、查询、修改等操作;中国核动力研究设计院[16]针对华龙一号反应堆设计的数字化反应堆系统可实现反应堆相关部件信息的统一管理;但目前针对反应堆全生命周期内产生的大量文件、数据的管理相对匮乏。本文立足于中国工程物理研究院多年来累积的核设施退役与三废处理项目相关技术经验,基于X反应堆退役工程,开发出了适用于反应堆全生命周期的退役数据系统,可实现大量文档的统一管理、数据的高效检索等一系列功能。

2. 反应堆退役数据系统的功能与结构

本文研发的反应堆退役系统,涵盖反应堆建造、运行到退役全生命周期内产生的数据,包括立项文件、批文、设计文件、图纸、方案、总结、运行过程记录、退役过程记录以及监测和测量分析数据等。系统可完成反应堆全生命周期数据的录入、存储、修改、查询、删除、导出、打印和备份等功能,从而实现大量文档以及反应堆数据(包括堆本体数据、注量场及辐射场数据以及退役工程数据)的多维度、立体化的集中统一管理。数据类型格式包括文档、表格、图片、视频、音频等。研发的退役系统除文档及数据管理外,还包括人员信息管理、系统维护以及资源可视化等功能。

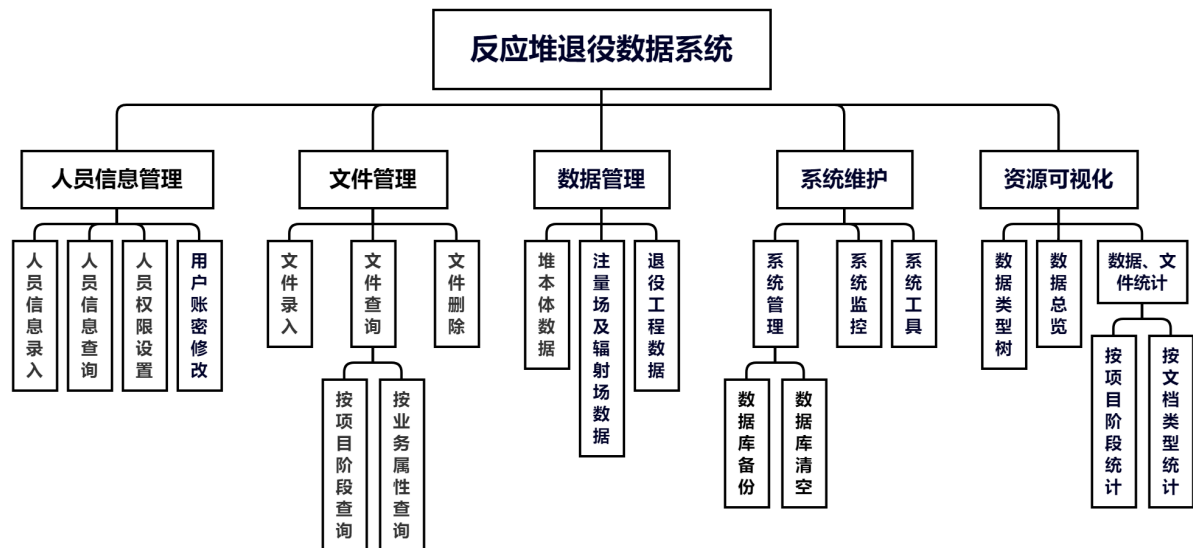


Figure 2. Function modules of Reactor decommissioning system

图 2. 反应堆退役系统功能模块

本系统功能模块由五部分构成(见图 2)，分别是人员信息管理模块、文件管理模块、数据管理模块、系统维护模块以及资源可视化模块。各模块功能如下：人员信息管理模块——实现反应堆退役工程相关工作人员基本信息的管理，如单位、性别、年龄等基本信息的录入、查询以及修改，此外也包括人员权限等级以及账号密码修改等相关设置；文件管理模块——实现反应堆全生命周期内产生的各种文档，包括反应堆在建造、运行、退役各阶段产生的立项文件、批文、设计文件、图纸文件、方案文件等的录入、查询以及删除功能；数据管理模块——实现反应堆数据，包括堆本体数据、注量场及辐射场数据以及退役工程数据的录入、查询以及删除等功能；系统维护模块——包括系统管理、系统监控以及系统工具，其中系统管理可实现数据库的备份与清空等操作。

文档按所属项目以及其在生命周期的时间点进行录入。录入文档时，需对文档的时间、责任人、标题、类型，以及其他自定义标签进行不同描述。系统支持文件通过浏览器上传，也支持 FTP 等协议的网络化传输应用，对于各类文件的录入提供先录后传、先传后录等多种录入方式。录入的所有文档存储在中心存储单元，数据库支持全文检索、关键词、标签、项目名、人员、类型、时间等多种查询条件，检索高效快速。

3. 反应堆退役数据系统的架构设计

反应堆退役数据系统采用先进浏览器/服务器(B/S)的三层架构：第 1 层为数据层；第 2 层为应用层；第 3 层为表示层。数据库的总体结构模型如图 3 所示。与传统 C/S 架构相比，在数据安全性、共享性以及系统稳定性上有所提高。

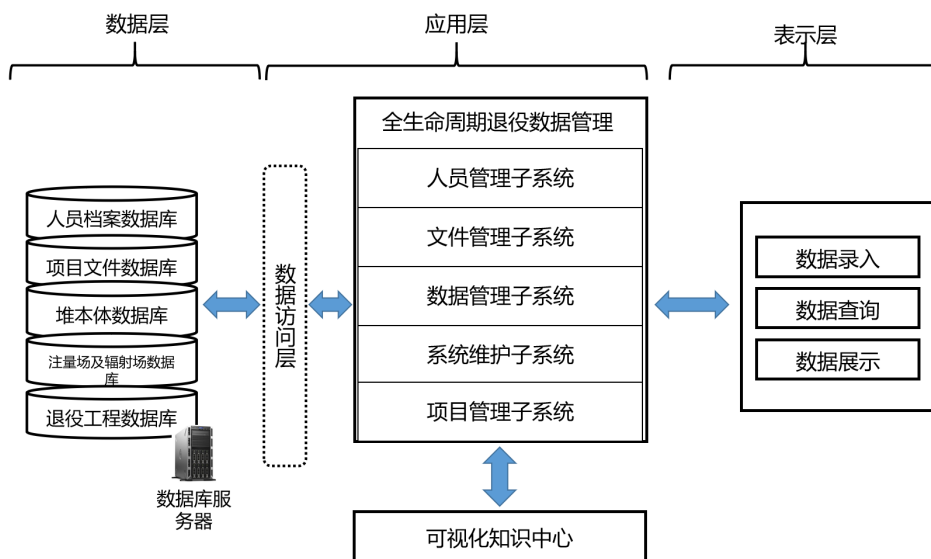


Figure 3. Architecture diagram of system B/S
图 3. 系统 B/S 架构图

系统总体结构主要包括中心数据库、全生命周期和可视化知识中心软件、数据录入、查询以及展示终端，分别对应 B/S 架构的数据层、应用层以及表示层，见图 4。全生命周期软件主要实现核设施立项到退役过程中所有信息、文档的录入、查询，并与可视化知识中心软件进行数据交互；可视化知识中心软件可对归档的各类电子文档进行进一步深入的处理，通过可视化、图形化的方式帮助了解核设施退

役相关项目的过程与细节。平台可适配 x86 (如 Windows 系统)和国产系统(如中标麒麟、中科方德等), 国产系统安全程度较高, x86 系统使用较普及及便利。

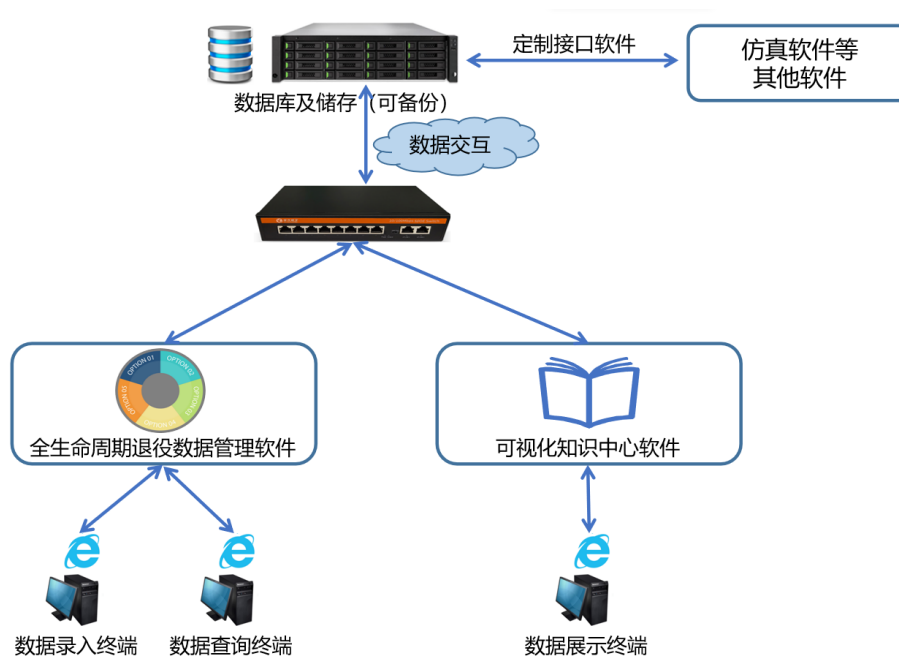


Figure 4. Architecture diagram of reactor decommissioning data system
图 4. 反应堆退役数据系统架构图

4. 反应堆退役数据系统管理软件

4.1. 全生命周期退役数据管理软件

软件以项目的全生命周期时间线为基准, 对项目建造、运营、拆除、退出过程中形成的各类文档和数据进行全面的数据管理。采用数据库对所有过程数据和文档进行全方位的收纳, 按所属项目以及其在生命周期的时间点录入各类数据, 包括电子文档、电子表格、图片、音频数据、视频录像数据等各种不同类型数据。录入的所有文档存储在中心存储上, 并采用立体化多维度结构进行数据的存储与管理。数据库支持全局模糊查询、关键词多条件精确查询两种查询方式。检索的结果可根据需要, 采用表格、时间线等多种方式进行排列, 也可按数据关系生成图表, 降低对操作人员的信息技术要求。

数据安全性方面, 在“人员信息管理”模块中可设置系统最高权限管理员、数据管理员、权限管理员、资料录入员、普通用户、只读用户等多种权限, 用户也可以自定义各类权限, 可按科室、密级、人员、权限等灵活设置, 从数据权限和功能权限上保证安全, 防止数据泄露。同时, 软件支持数据库的各类基本安全操作, 在“系统维护”模块可实现数据的全量、增量、定时、手动等多种方式备份, 从而保证数据的安全。

该软件操作界面用户友好、页面简洁, 见图 5。系统主界面的一级菜单包括首页、分类查询、文件管理、数据录入、项目管理、系统维护以及人员信息管理七大模块, 以系统首页为例, 包括模糊查询、精确查询、文件录入和数据看板四个二级菜单, 最下方还有堆本体数据、注量场及辐射场数据以及退役工程数据的入口, 可极大地提高操作效率。



Figure 5. Operation interface diagram of decommissioning data management software of full life cycle
图 5. 全生命周期退役数据管理软件操作界面示意图

4.2. 可视化知识中心软件

本次建设的可视化知识中心软件，对“全生命周期退役数据管理软件”归档的各类电子文档进行了进一步深入的处理。采用可视化的方式，可以对所有电子文档的录入、采集等全过程进行统一的监控；通过图形化、可视化的方式来整体了解项目的过程与细节；通过知识软件管理，能够快速向项目提供产品和服务；通过减少多余或不必要环节，让流程自动化，精简操作，降低成本。软件具备大数据驾驶舱模式，可以通过一张大图，整体显示数据库内所有文档的归档信息、数据量、在线运行情况等。通过图形化图标和动态变化显示数据库内文档的各类形态，同时支持图片、音频、视频等的在线播放。系统界面见图 6。



Figure 6. Interface of resources visualization software
图 6. 资源可视化软件界面

5. 数据储存

本文研发中配置了一台用于储存数据的高速网络化存储设备,采用支持 EB 级数据扩展的存储,支持海量数据存储,支持日后设备的扩展和扩充。

存储支持空间回收功能;支持完备的 NAS 存储相关协议,如 NFS、CIFS 协议等;支持前端切片技术的高速专有文件协议,满足超高性能需求;支持块存储协议等。存储自带存储服务软件,存储服务软件用于对存储进行云管理。软件支持按照组织架构划分部门与员工,在线灵活分配部门、员工的可用空间;支持实现多用户之间进行数据分享,且不通过传输的方式,只通过共享完成,且可设置权限;支持在管理端在线动态配置单独用户对部门目录的权限,并即刻生效;具有类似回收站功能,该功能可使用户找回某天删除的文件,可恢复设置时间段内误删的数据,保证数据的安全性。

数据储存在管理上可实现数据通道负载均衡管理、存储容量负载均衡管理以及配额管理的要求。数据通道负载均衡管理:无须额外软件,即可实现数据访问流量的负载均衡,自动切换故障通道。存储容量负载均衡管理:支持存储容量的动态负载均衡,当新增磁盘或节点时,能够实现存储空间的动态负载均衡。配额管理:支持基于目录的空间配额管理,支持多级子目录的空间配额管理。

6. 结语

反应堆在其生命周期内会产生大量的技术文件和相关数据,这些数据、文档等是我国核工业的宝贵资料,具有重要意义。本文立足于中物院核物理与化学研究所多年来积累的核设施退役与三废处理项目相关经验,基于 X 反应堆退役工程开发出了适用于反应堆从建造到退役的全生命周期的退役数据系统,可实现反应堆建造、运行、维护,退役中大量物件、图纸、数据、记录等的收集、贮存、管理和分析。

参考文献

- [1] 张中亮,张永领,赵苑,丁然. 反应堆退役虚拟仿真技术研究现状[C]//中国核学会. 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 8 册(辐射研究与应用分卷、核技术工业应用分卷、辐照效应分卷、核电子学与核探测技术分卷、核医学分卷、放射性药物分卷): 2019 年卷. 北京: 中国原子能出版社, 2019: 72-82.
- [2] 邵一穷,王荣东,董静雅. 钠冷快堆退役技术研究现状及建议[J]. 产业与科技论坛, 2022, 21(24): 54-57.
- [3] 栗园园. 核设施退役与废料处理机器人关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [4] 杨静,张迪文,伍黎丹,赵珊. 档案管理数字化转型的现状与发展分析: 以反应堆工程研究所为例[J]. 机电兵船档案, 2021(5): 78-81.
- [5] 张颖,于潇. 便于退役的数据库与仿真平台的研究与实现[J]. 电子技术, 2021, 50(3): 30-31.
- [6] 刘林. 计算机科学与技术的发展与展望[J]. 集成电路应用, 2023, 40(3): 338-339.
- [7] 吴建军. 计算机网络技术的应用与发展[J]. 集成电路应用, 2023, 40(4): 283-285.
- [8] Ishikawa, M., Kawasaki, M. and Yokota, M. (1990) JPDR Decommissioning Program—Plan and Experience. *Nuclear Engineering Design*, **122**, 357-364. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(90\)90219-N](https://doi.org/10.1016/0029-5493(90)90219-N)
- [9] Iguchi, Y., Kanehira, Y., Tachibana, M. and Johnsen, T. (2004) Development of Decommissioning Engineering Support System (DEXUS) of the Fugen Nuclear Power Station. *Journal of Nuclear Science Technology*, **41**, 367-375. <https://doi.org/10.1080/18811248.2004.9715497>
- [10] 李睿之,孔彦荣,张立军. 核设施退役三废信息跟踪与管理信息系统结构设计[J]. 科技创新导报, 2018, 15(18): 37-38, 40.
- [11] 王邵,刘坤贤,张天祥. 核设施退役工程[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2013: 15-19.
- [12] 郑莉,韩丽,鲍芳. 核电站一回路退役技术研究[J]. 广东化工, 2023, 50(6): 153-154.
- [13] 宋怡. 101 堆退役数据库建立及实现技术研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.

- [14] 杨坤, 李睿之. 反应堆退役废物信息管理系统研究设计[J]. 科技创新导报, 2016, 13(8): 1-3.
- [15] 刘永阔, 宋怡, 吴小天, 刘震. 核设施退役信息数据库的结构与功能设计[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(7): 1256-1263.
- [16] 刘盈, 罗骞, 张思原, 等. 数字化反应堆关键数据梳理及数据框架研究[J]. 科技视界, 2020(26): 1-4.