



## 小堆结构材料全生命周期数据管理系统设计研究

宋丹戎, 许斌, 刘佳, 秦冬, 张显均, 王卓, 朱虹

### Design and Research of Data Management System for the Whole Life Cycle of Small Modular Reactor Structural Materials

Song Danrong, Xu Bin, Liu Jia, Qin Dong, Zhang Xianjun, Wang Zhuo, and Zhu Hong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2022.05.0119>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### 核反应堆设计软件验证数据库系统的研制

Development of Nuclear Reactor Design Software Verification Database System

核动力工程. 2019, 40(1): 135–139

#### 基于大数据和关系型数据相融合的反应堆远程运维数据管理系统开发

A Remote Operation and Maintenance Data Management System for Nuclear Reactors Based on Integration of Big Data and Relational Data

核动力工程. 2020, 41(2): 202–206

#### 基于R2S方法的反应堆结构材料活化剂量计算研究

Study on Activation-Induced Dose Calculation of Reactor Structural Materials

核动力工程. 2021, 42(5): 103–109

#### 小型模块化超临界水冷堆研发

Supercritical Water-Cooled Small Modular Reactor R&D

核动力工程. 2021, 42(6): 72–76

#### 小型模块化超级安全气冷堆中子学特性研究

Research on Neutronics Characteristics of Small Modular Super-Safe Gas-Cooled Reactor

核动力工程. 2019, 40(6): 13–19

#### 重水冷却钍基长寿命模块化小堆概念设计研究

Conceptual Design of a Reduced Moderation Long-Life Heavy Water Cooled Thorium Small Modular Reactor

核动力工程. 2021, 42(2): 23–28



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2022)05-0119-07; DOI:10.13832/j.jnpe.2022.05.0119

# 小堆结构材料全生命周期数据管理系统设计研究

宋丹戎<sup>1,2</sup>, 许斌<sup>1,2\*</sup>, 刘佳<sup>1,2</sup>, 秦冬<sup>1,2</sup>,  
张显均<sup>2</sup>, 王卓<sup>3,4</sup>, 朱虹<sup>4</sup>

1. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213; 2. 中国核动力研究设计院, 成都, 610213;  
3. 中南大学, 长沙, 410083; 4. 成都材智科技有限公司, 成都, 610041

**摘要:** 小型模块化反应堆(简称小堆)结构材料具有种类繁多、来源广泛和格式多样等特点。基于现代信息技术及大数据背景,结合小堆结构材料数据的特殊性,从材料数据管理角度出发,设计构建了一个覆盖小堆结构材料全生命周期的专用数据管理系统,实现从碎片化数据获取到海量数据集成、处理并融合的转变。整个系统不仅实现了自定义数据库设计,还实现了小堆结构材料全生命周期数据的管理和应用,满足用户数据查询、数据检索、可视化分析等多种需求,有利于推进小堆结构材料数据管理向规范化、智能化发展。同时该数据管理系统突破了多尺度材料数据管理技术瓶颈,增强了材料数据的安全性和可靠性,为数字化小堆研发设计提供了重要支持。

**关键词:** 小型模块化反应堆; 结构材料; 全生命周期; 数据管理; 系统管理  
**中图分类号:** TP3 **文献标志码:** A

## Design and Research of Data Management System for the Whole Life Cycle of Small Modular Reactor Structural Materials

Song Danrong<sup>1,2</sup>, Xu Bin<sup>1,2\*</sup>, Liu Jia<sup>1,2</sup>, Qin Dong<sup>1,2</sup>,  
Zhang Xianjun<sup>2</sup>, Wang Zhuo<sup>3,4</sup>, Zhu Hong<sup>4</sup>

1. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China;  
2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China; 3. Central South University, Changsha, 410083, China;  
4. MatAi, Chengdu, 610041, China

**Abstract:** The structural materials of small modular reactors (SMR) are characterized by a wide variety of types, sources and formats. Based on the background of modern information technology and big data, combined with the particularity of small reactor structure material data, a special data management system covering the whole life cycle of small reactor structure materials is designed and constructed from the point of view of material data management, which realizes the transformation from fragmented data acquisition to massive data integration, processing and fusion. The whole system not only realizes the design of user-defined database, but also realizes the management and application of the whole life cycle data of small reactor structural materials, meeting the user's needs for data query, data retrieval, visual analysis, etc., which is conducive to promoting the standardized and intelligent development of small reactor structural materials data management. At the same time, the data management system breaks through the technical

收稿日期: 2021-11-22; 修回日期: 2022-01-18

基金项目: 四川省科技计划资助(2019ZDZX0001); 国家重点研发计划资助(2018YFE0207400)

作者简介: 宋丹戎(1969—), 男, 研究员级高级工程师, 现主要从事中小型反应堆设计及核能供热可行性方面的研究, E-mail: songdanrong@163.com

\*通讯作者: 许斌, E-mail: xubilly@163.com

bottleneck of multi-scale material data management, enhances the security and reliability of material data, and provides important support for the digital R&D and design of small reactors.

**Key words:** Small modular reactor (SMR), Structural materials, Whole life cycle, Data management, System management

## 0 引言

全球低碳能源发展迅速,其中多用途核能应用领域大规模增加。与大型核反应堆建设条件苛刻、选址要求高和开发成本昂贵等特点相异,小型模块化反应堆(简称小堆)以其安全灵活、适用性广、建设造价低和周期短等特点提供了不同的核电联产解决方案,正在被国内市场逐步接纳并表现出广阔的发展前景,有望开创核能多用途新时代<sup>[1-3]</sup>。据悉,在全球已经推出近70多种小堆设计,为占领国内外核电市场,我国也在加快小堆设计研发步伐,其中自主研发的“玲龙一号”已于2021年7月正式开工建设,浇灌了核岛第一罐砼(FCD)。然而经济性和安全性在很大程度上限制了小堆的商业化应用进程,因此研发设计更为安全可靠的核电反应堆结构材料,成为提升优化小堆商业应用经济性和安全性的重要着力点之一。

核电小堆结构材料是指用于核燃料元件包壳和其他堆芯构件的各类材料,是反应堆的重要组成部分,其种类繁多且各项性能数据获取困难,常在超高温、强腐蚀和强辐照等严苛条件下进行实验测试,因此需要高效可靠的数据管理系统对数据进行规范化存储<sup>[4]</sup>。此外,网络化、数字化、智能化标准正引导各行各业的发展,人们愈加意识到构建专业材料数据管理系统的重要性。目前各个国家均在大力开展材料数据管理系统的研发,法国、日本、英国和美国等相继建成了用于核工业、核燃料和聚变材料类的材料数据库和数据管理系统,实现了大量性能数据实时收录的要求,也呈现出不同的功能模块如数据绘图、数据审核和智能导入等,但是以上数据管理系统或者数据标准体系不健全,或者数据协同效率低、数据分散难追溯,又或者数据安全难保障、数据失真和丢失的情况时有发生<sup>[5-8]</sup>。因此,基于现有材料数据管理系统的优缺点,针对小堆结构材料数据整理和安全存储等方面的需求,中国核动力设计院核反应堆系统设计技术重点实验室联同成都材智

科技有限公司(MatAi)建立了专业稳定、通用性强、功能庞大、易于维护的小堆结构材料全生命周期数据管理系统。

## 1 数据管理系统设计原则和方法

根据小堆结构材料研发过程中产生的数据关系复杂、来源多和存储形式多样等特点,设计开发针对小堆结构材料的全生命周期数据管理系统。如图1所示,小堆结构材料数据管理系统的构建是以小堆结构材料全生命周期数据为依据,制定元数据模型标准实现数据规范化统一化管理;然后采用多源异构自适应数据导入技术,将电子文档(EXCEL、TXT、CSV、XML)等文件格式的结构化数据自动导入,用户可将历史数据电子文档、相关设备导出文件、材料相关软件的计算结构文件等数据通过该技术导入到小堆结构材料全生命周期数据管理系统;此外,通过分布式密集型海量数据无损传输技术保证数据完整、高速稳定地在材料计算软件和数据管理系统间进行传输,方便计算软件直接调取数据进行高通量计算,计算得到的大量数据仍可快速存储于材料数据管理系统中进行查看和应用;以上技术的支持改变了传统数据管理方式无法整合不同来源、不同结构数据的弊端,突破了多源异构数据管理技术瓶颈,实现了材料从设计到服役再到应用全生命周期数据的汇交融合、存储与使用,为后续通过数据挖掘技术探究微观到宏观多尺度材料成分-工艺-性能-服役关系模型规律打下坚实的基础,从而进一步实现材料科学多模态数据采集、传输、存储、共享可视化“一体化数据链”。

小堆结构材料全生命周期数据管理系统基础设施建设框架如图2所示,基于系统总体规模的复杂程度和其对于稳定性、安全性的要求,本系统采用浏览器/服务器(B/S)架构来实现,从物理硬件到用户层面总共划分为5个层面结构<sup>[9-10]</sup>。首先,数据核心能力基础设施建设包括系统网络硬件资源建设和研发数据标准体系建设,为数据系

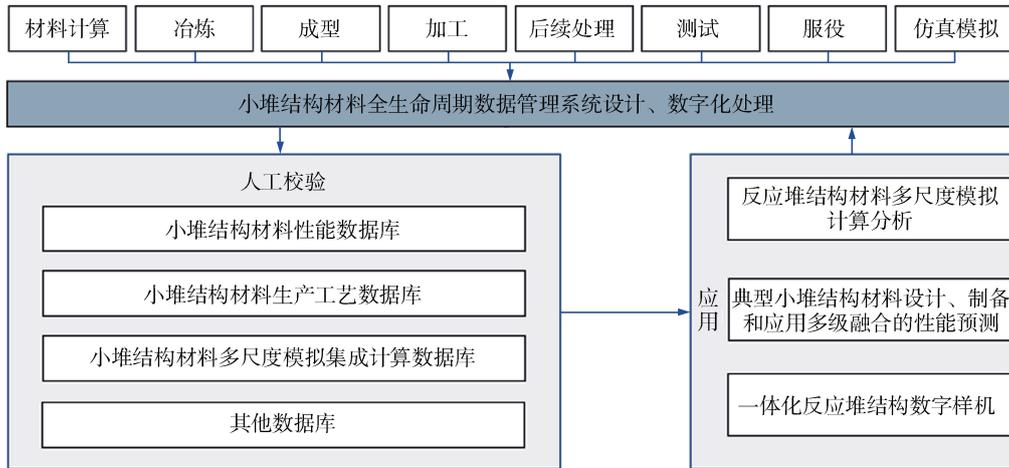


图 1 小堆结构材料数据管理系统设计及数字化处理内容

Fig. 1 Data Management System Design and Digital Processing Content of SMR Structure Material

统的建设提供硬件基础和数据处理规范，其中统一的数据处理标准和规范是实现研发数据集成、处理、汇交、存储等的前提，同时也为数据服务的可拓展性和通用性打下基础，避免因信息壁垒而形成数据孤岛；数据层主要负责存储和管理底层数据，主要是由历史文件、材料计算软件结果、测试与表征结果和外部数据库构成；软件层

由构成小堆结构材料全生命周期数据管理系统的 3 个子系统呈现；应用层则是以这一层面中每个应用模块支持的功能作为工具，向用户提供可支持的业务功能和应用程序接口，支撑用户解决业务需求，同时也可根据用户喜好对相应的功能点进行灵活拓展或定制。以上 5 个层面构建出的数据管理系统可实现小堆结构材料全生命周期数



图 2 小堆结构材料数据管理系统基础建设内容

Fig. 2 Data Management System Infrastructure of SMR Structure Material

据管理,全面涵盖小堆结构材料从设计、计算、仿真、测试、生产、应用及服役等环节产生的数据,材料数据可追溯审计的特性将大幅提升数据质量管控,保证数据一致性,降低高价值数据丢失风险,满足各部门对多源异构材料数据的管理应用需求。

## 2 数据管理系统架构及功能

### 2.1 数据管理系统构架

小堆结构材料数据管理系统的研究主要包括 2 部分的内容:①围绕数据库的开发开展工作,主要通过现有的计算机技术,开发设计小堆结构材料研发数据库,构建整个智能小堆各个部件材料体系的数据库框架,如此不仅可以有效管理堆内构件材料数据,还可通过其拓展性强的特点实现反应堆压力容器、控制棒驱动机构、反应堆支撑结构、蒸汽发生器等反应堆及同一回路系统设备中不同牌号金属材料数据的管理与应用;②由于研发数据量庞大,研发人员使用时查找相关数据难度较大,因此在第一部分数据集成形成数据库的基础上设计开发数据搜索、统计、分析及可视化等功能,完整设计出小堆结构材料全生命周期数据管理系统,用于研究人员查看、修改、添加和快速精准地检索数据。这 2 部分相辅相成,共同推动小堆的智能化设计与制造。

小堆结构材料全生命周期数据管理系统架构如图 3 所示,包含 3 个子系统。其中客户端系统和数据库配置系统 2 个子系统可支持材料数据的管理与应用、数据库设计,在客户端系统中可直接对数据进行前台管理与应用,包括数据的导入导出、数据检索、接口管理和可视化分析应用等,而数据库的设计搭建和字段属性及权限配置则是通过数据库配置系统进行,该系统支持对数据库的层级结构、字段类型、数据记录的自定义展示等进行后台设计和配置,配置完成数据库框架后,即可在客户端进行查看与应用;平台综合管控系统对系统中用户数及角色的划分、安全审计和系统界面等进行统一管控。



图 3 小堆结构材料数据管理系统架构示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of the Data Management System of SMR Structure Material

小堆结构材料全生命周期数据管理系统的详细功能如表 1 所示。

### 2.2 平台综合管控系统功能

平台综合管控系统(图 4)可对整个系统进行管控,提供页面用户身份验证和接口验证,保证用户信息的安全性和数据传输的可靠性和效率。其中,系统单点登陆方式可支持用户在客户端、数据库配置系统和平台综合管控系统之间进行跳转,系统总体以数据为中心,程序设计和数据具有较高的独立性,设置有开放应用程序接口(Open API)管理,通过 API 授权可将数据安全地共享至其他平台。为增强系统中材料全生命周期数据的安全性,可通过管控平台中用户管理功能添加/删减系统用户,对用户进行分组并进行角色定义,不同角色等级的用户具备不同的权限,针对不同数据库中的不同数据表也进行统一的权限设置和控制,权限可细分至 1 条数据记录,同时普通用户对于数据记录的修改、删除和发布等操作均需要具有高一级权限的管理用户进行安全审批,这样既可以保证数据的安全性和完整性,同时还能为用户提供可靠、灵活的共享服务。

### 2.3 客户端系统功能

在客户端系统中主要有材料数据管理模块、材料数据检索模块和材料数据分析模块,如图 5 所示。其中材料数据管理模块需要将小堆结构材料全生命周期中产生的数据进行收集、分类存储,便于以后的应用分析。系统内置 3 个数据库,分别为小堆结构材料性能数据库、典型反应堆结构材料生产工艺数据库和小堆结构材料多尺度模拟集成数据库。其中小堆结构材料性能数据库主要包括材料特性与应用范围、化学成分、物理性能、力学性能(硬度、拉伸性能、冲击性能、许用应

表 1 小堆结构材料数据管理系统功能

Tab. 1 Detailed Functions of the Data Management System of SMR Structure Material

序号	模块	功能	功能特性
1	数据管理	数据导航、数据显示、数据列表、数据导入/导出、数据移动、数据统计、数据分析	可快速定位访问内容，全局显示设置灵活多样，可直观进行数据记录对比，支持多种形式数据导出，支持统计分析图表展示与导出
2	数据分析	表格分析、散点分析、曲线分析	支持分析绘图、行列数据置换，多种散点拟合算法、多个Y轴变量、自定义图例信息、导出分析结果
3	数据搜索	字段检索、全文搜索、高级搜索	可支持自定义字段、系统属性、关键字、全文检索数据，查找数据信息
4	数据事务	数据审核、导出审批、查阅审批	审核机制确保发布共享数据准确，支持临时授权导出数据记录/访问数据
5	数据库管理	成员管理、常量管理、公共属性管理、数据库分组、数据库导入/导出	支持定义管理员权限信息，进行多层次管理数据库，支持数据导出至本地
6	数据表管理	属性管理、布局管理、文件夹管理、权限管理、数据关联、导入/导出模板、多表导入、API管理	可提供丰富的字段类型，进行属性权限和子属性设置，支持设置布局分组信息、多个布局，可自定义文件夹，支持授权访问，数据关联关系定义，可设置访问权限
7	用户管理	用户管理、用户字段设置、组织部门管理	支持批量用户授权、自定义用户字段、多层次管理部门信息和标签分类
8	权限管理	用户组管理、角色管理、平台管理员管理	支持新建、查看、编辑用户组信息，支持批量添加移除成员
9	数据备份	手动备份、自动备份	支持手动备份数据信息，自动备份状态、周期
10	安全审计	用户审计、数据审计、授权审计、日志审计	记录管理员对用户操作信息、授权信息、日志列表访问信息
11	系统配置	外观设置、密码策略、搜索设置、数据库设置	支持自定义设置系统登录外观，登录密码及服务器管理等



图 4 小堆结构材料平台综合管控系统功能

Fig. 4 Platform Integrated Management and Control System Functions of SMR Structure Material

力、疲劳性能、断裂韧性、蠕变性能)、耐蚀性能、辐照下材料性能变化等数据;典型反应堆结构材料生产工艺数据库主要包括工艺流程、冶炼工艺、成形工艺、热处理工艺等数据;小堆结构材料多尺度模拟集成数据库主要包括第一性原理数据(晶体结构数据、电子态密度数据、线性光学数据、能带性质数据)、热力学性质数据(焓、熵、吉布斯自由能、稳态相、成分、比热容)等数据,面向研究人员提供第一性原理计算和热力学计算服务,并将计算数据在系统上进行存储与可视化分析。目前,前2个数据库整理自《核电厂金属材料手册》、《ASME BPVC. II.D.M-

2019 Properties (Metric)》、《RCC-M-Edition 2007 SECTION II MATERIALS》,其中部分数据来源于在线数据库,如欧洲原子能共同体建设的MatDB数据库、MatNavi数据库、核反应堆材料数据库、MatWeb数据库、国际原子能机构(IAEA)数据库等。

材料数据检索模块方便研发人员快速调取查看、修改、添加、以及快速精准地检索不同的材料数据(包括曲线、图片、文档类数据)。该模块支持用户对特定的字段属性或数据记录进行全局搜索,还可支持多维组合高级检索,能够通过设置元数据、字段属性及全文搜索方式提升检索

客户端系统		
材料数据管理	材料数据检索	材料数据分析
数据导入/导出	字段属性搜索	材料性能对比分析
数据编辑	全局搜索	材料成分对比分析
统计分析视图	高级检索	可视化图表展示
数据汇总	多维组合检索	可视化图表编辑

图5 小堆结构材料客户端系统功能

Fig. 5 Client System Functions of SMR Structure Material

准确度。

材料数据分析模块可用于材料性能和成分对比分析,并将这些分析结果以可视化图表的方式展示,便于研发人员发现材料性能规律,优化选材用材的方式和途径。对于某些上传的原始数据属性,可自动生成可视化图表,图表工具可以对曲线图进行简单的编辑操作,如修改坐标轴名称、设置坐标轴数值显示范围和方式、缩放图表等。新建分析时可选择不同数据库下的不同数据表进行图表对比分析,可支持3种不同类型的分析:①表格对比可灵活地配置感兴趣的数据进行对比分析,直观地发现数据之中隐含的规律;②散点图对比在分析较多数据中的2个属性之间的相互制约关系时尤其有效;③曲线对比常用于分析不同样品的材料性能曲线差异。此外,用户还可以直接导出或打印对比分析结果。

#### 2.4 数据库配置系统功能

数据库配置系统(图6)可支持构建数据库和数据库文件夹,数据库层级可根据用户对数据管理的需求自定义拓展,最多支持拓展到6个层级,对材料数据的划分更为详尽;系统中内置有丰富的字段属性,如数值类、文本类、资源类、专业数据类和其他等,基本覆盖用户所能涉及的类型,可满足不同类型数据的存储要求;数据导入时系统内置导入模板可进行批量导入,也可支持新建插件导入多源异构材料数据,同时大批量入库的数据可通过文件夹分组管理;布局管理中可支持自定义设计数据记录显示界面,根据用户需求自定义调整显示顺序,有效布局简化数据记录内容;还具有数据预警的特色功能设置,快速定位非法数据录入,供用户提高数据质量;此外,对于不同的数据库可对其进行成员管理和常量管理,增加数据库使用的便捷性,针对每个数据表均设置了操作权限,尽可能保证数据的安全性,

防止重要数据被随意删除、篡改,达到对数据记录进行安全管理的目的。

数据库配置系统		
数据库管理	数据表管理	
成员管理	布局管理	权限管理
常量管理	成员管理	API管理
导入/导出管理	字段属性管理	关联属性管理
显示设置管理	公共属性管理	模板配置管理

图6 小堆结构材料数据库配置系统功能

Fig. 6 Database Configuration System Functions of SMR Structure Material

### 3 总结与展望

中国核动力研究院核反应堆系统设计技术重点实验室与MatAi团队自主研发的小堆结构材料全生命周期数据管理系统已基本完成,本文基于该数据管理系统的设计原则、方法及系统架构等,通过不同的功能模块实现了反应堆结构材料多尺度集成计算、实验、生产与应用,以及全生命周期数据的自动采集、管理、分析与应用。针对小堆智能化和数字化研究的重大需求,构建了数据管理系统,在数据管理系统的基础上构建的小堆结构材料性能数据库、典型反应堆结构材料生产工艺数据库和小堆结构材料多尺度模拟集成数据库可进一步加速智能化小堆数字化的设计研究进程。

小堆结构材料全生命周期数据管理系统的发展还需要持续不断地优化完善,拟在今后的工作中将智能化小堆结构材料数字化的研究设计重心转移至几方面:①在反应堆数据整合上广泛进行国内外的各项合作,增加数据库中数据来源,保证其后续拓展;②开发可支持性能数据在线绘图、统计分析等功能模块,简化研发流程;③以数据库中已有数据为基础,针对未知材料智能预测其性能,构建专家分析系统并有效应用,以为后续智能化小堆的发展提供强大的助推作用。

#### 参考文献:

- [1] 熊厚华,杜继富,曾正魁,等. 模块式小型反应堆研究发现及前景分析[J]. 价值工程, 2015, 34(2): 30-31.
- [2] 刘建阁,陈刚,汤青松,等. 近海水下小型模块化反应堆技术选择调研分析[J]. 核科学与技术, 2020, 8(3): 112-122.
- [3] 温鸿钧. “华龙一号”:世界核电“希望之星”[J]. 中国

- 核工业, 2015(5): 18-21.
- [4] 罗晓秋, 刘伟东, 王放. 核电小堆发展现状及前景展望[J]. [东方电气评论](#), 2021, 35(4): 85-88.
- [5] 翟向伟, 沈龙凤, 李春京, 等. 核反应堆材料数据库系统及其应用[J]. [核科学与工程](#), 2016, 36(3): 360-365.
- [6] 沈龙凤, 翟向伟, 李春京, 等. 核反应堆材料数据库NRMD的设计与实现[J]. [核科学与工程](#), 2015, 35(4): 639-644.
- [7] 宋晓艳, 刘东, 刘雪梅, 等. 面向数据驱动材料设计的专用数据库及信息管理系统[J]. [中国科学\(技术科学\)](#), 2020, 50(6): 786-800.
- [8] 李姿昕, 张能, 熊斌, 等. 材料科学数据库在材料研发中的应用与展望[J]. [数据与计算发展前沿](#), 2020, 2(2): 78-90.
- [9] 韩超, 罗钊航. 多源异构核电数据管理系统设计[J]. [科技创新与应用](#), 2021(5): 75-77.
- [10] 申屠军, 李小燕. 核电数字化设计体系的组成和数据管理[J]. [仪器仪表用户](#), 2017, 24(11): 68-72.

(责任编辑: 邱彦)