

核能领域数字化建设及数据治理的理论建构与实践路径

唐蓉

国核信息科技有限公司，山东 济南 250000

DOI:10.61369/EPTSM.2026020027

摘 要： 在全球能源转型与数字技术革命深度耦合的背景下，数字化转型已成为核能产业突破安全管控瓶颈、提升全生命周期运营效能的核心路径。本文基于核能产业“安全优先、全链协同、自主可控”的特殊属性，系统构建了“五层三维”数字化建设总体架构，深入剖析了数据治理的核心机制与实施逻辑，并结合国内外典型实践案例，探讨了数字孪生、人工智能、区块链等关键技术的融合应用模式。研究聚焦核能领域数字化建设中的安全保障、标准统一、技术适配三大核心难题，提出了“制度-技术-人才”三位一体的协同解决方案，为我国核能产业数字化转型从“场景级应用”向“体系化赋能”跨越提供理论支撑与实践指引。

关 键 词： 核能产业；数字化建设；数据治理；安全保障；技术融合

Theoretical Construction and Practical Path of Digital Construction and Data Governance in the Field of Nuclear Energy

Tang Rong

State Nuclear Power Information Technology Company Ltd.Jinan, Shandong 250000

Abstract： Against the backdrop of the deep integration between global energy transition and digital technology revolution, digital transformation has become the core pathway for the nuclear energy industry to break through safety control bottlenecks and enhance operational efficiency throughout its lifecycle. Based on the unique characteristics of the nuclear energy sector— "safety first, full-chain coordination, and self-reliance" —this paper systematically constructs a "five-layer, three-dimensional" digital infrastructure framework. It provides an in-depth analysis of the core mechanisms and implementation logic of data governance, while exploring integrated application models of key technologies such as digital twins, artificial intelligence, and blockchain through domestic and international case studies. The research focuses on three core challenges in nuclear digitalization: safety assurance, standard unification, and technical compatibility. A tripartite collaborative solution integrating institutional frameworks, technological capabilities, and talent development is proposed, offering theoretical support and practical guidance for China's nuclear energy industry to transition from "scenario-level applications" to "system-wide empowerment" in its digital transformation journey.

Keywords： nuclear energy industry; digital transformation; data governance; security assurance; technology convergence

引言

全球“双碳”目标下，核能作为低碳稳定的基荷能源，其战略地位持续凸显。数字技术与能源产业的深度融合已成不可逆趋势，人工智能、大数据、数字孪生等技术为核能产业突破传统发展瓶颈提供了新范式。国内研究近年来呈现快速发展态势，主要集中在应用场景区创新与数据标准建设。现有研究已形成一定的理论基础与实践积累，但仍存在三方面不足：一是数字化建设架构多聚焦单一环节或技术应用，缺乏覆盖全生命周期的系统性建构；二是数据治理研究偏重于标准制定，对安全与效率的平衡机制、跨主体协同治理模式探讨不足；三是对核心技术的核电场景适配性研究不够深入，尤其是自主可控技术的应用路径尚不清晰。基于此，本文立足核能产业特殊性，构建数字化建设与数据治理的一体化理论框架，为解决行业实际问题提供新视角。

一、核能领域数字化建设的理论框架与核心架构

（一）数字化建设的核心约束与原则

核能领域数字化建设面临三大特殊约束：一是安全约束，核安全与数据安全并重，任何技术应用都必须满足严格的安全验证要求；二是全生命周期约束，核电项目从设计、建设到运维、退役跨度长达60年以上，需保障数据的长期有效性与系统兼容性；三是多主体协同约束，涉及核电企业、监管机构、上下游产业链等多个主体，需实现数据互通与利益协同^[1]。

基于上述约束，数字化建设应遵循四大核心原则：安全优先，将核安全与数据安全贯穿建设全过程，建立多层级安全保障体系；数据驱动，以数据资产化为核心，推动业务流程优化与智能决策；统筹规划，强化顶层设计，避免重复建设与数据孤岛；自主可控，关键技术与核心系统优先采用自主创新成果，降低安全风险。

（二）“五层三维”总体架构设计

结合核能产业特征与数字化技术发展趋势，本文构建“五层三维”数字化建设总体架构。“五层”为技术实现层面，包括感知层、网络层、平台层、应用层与安全层；“三维”为保障维度，包括标准规范维、组织管理维与人才支撑维，各层级与维度相互协同，形成有机整体^[2]。

感知层是数据采集的基础，实现物理世界与数字世界的精准映射。通过部署抗辐射智能传感器、巡检机器人等设备，实时采集设备运行参数、环境辐射水平、工程建设进度等多维度数据，数据采样频率针对关键安全参数不低于1kHz，确保数据的实时性与准确性。该层采用“自动捕获+人工补录”相结合的模式，核心安全数据优先通过系统自动采集，确保数据真实性。

网络层承担数据传输功能，采用“工业以太网+现场总线”混合组网模式，遵循 IEC 61588 标准实现 μs 级时间同步。构建“物理隔离+逻辑隔离”的双重防护体系，生产控制网与管理信息网严格物理隔离，关键数据传输采用加密协议，防止数据泄露与网络攻击。同时部署边缘计算节点，在数据源头完成实时处理与分析，满足核电系统低时延要求^[3]。

平台层是数字化建设的核心引擎，包括三大核心平台：工业互联网平台实现设备、系统与业务的互联互通；数字孪生平台构建物理实体的虚拟镜像，支持仿真模拟与优化决策；AI算法平台提供故障诊断、异常预警等智能分析能力。

应用层是价值实现的载体，覆盖核电全生命周期核心业务。在设计阶段，基于 BIM 技术实现协同设计与数字化移交；在建设阶段，通过智慧工地系统实现进度、质量、安全的一体化管控；在运维阶段，开展智能巡检、设备健康管理与运行优化；在退役阶段，通过仿真模拟优化退役方案。各应用场景数据互联互通，形成全链条数字化管理闭环^[4]。

安全层是建设保障的关键，构建“网络安全+数据安全+功能安全”三位一体的防护体系。网络安全采用等级保护与分级保护相结合的方式，部署防火墙、入侵检测等设备；数据安全实现全生命周期管控，包括加密存储、访问控制、脱敏处理等；功能安全通过故障树分析、失效模式验证等方法，确保数字化系统符合核安全要求^[5]。

“三维保障体系”为架构落地提供支撑：标准规范维包括数

据标准、技术标准、管理标准等；组织管理维建立跨部门协同机制，明确各主体职责；人才支撑维构建复合型人才培养体系，满足技术融合需求。

（三）核心应用场景的数字化转型路径

核电运维数字化：以数字孪生与 AI 技术为核心，构建设备全生命周期管理体系。通过数字孪生模型整合设计、制造、运行数据，实现设备健康状态的实时监测与故障预测；利用 AI 算法对运行数据进行深度分析，优化维护策略，降低非计划停堆风险。中国广核集团的“智驭平台”通过实时数据监测与智能预警，使设备故障响应时间缩短 40% 以上^[6]。

工程建设数字化：基于 BIM 技术构建三维数字模型，实现设计、施工、监理的协同作业。通过数字化移交系统，将工程建设过程中的各类数据无缝传递至运维阶段，保障数据的连续性。国家能源局首批示范项目中的“智慧工地”场景，通过物联网技术实现人员、设备、材料的实时管控，使工程建设效率提升 20%，成本降低 15%。

核安全监管数字化：构建核安全大数据监测平台，整合核电企业、监管机构与第三方检测数据，实现安全状态的实时感知与智能预警。开发应急响应数字化系统，通过仿真模拟技术优化应急处置方案，提升核事故应对能力。监管数字化不仅提高了监管效率，也为政策制定提供了数据支撑^[7]。

核燃料循环数字化：利用区块链技术构建核燃料全生命周期溯源系统，实现从生产、运输、使用到储存的全程可追溯。基于大数据分析优化核燃料装载方案，提高燃料利用率，降低乏燃料产生量。区块链技术的不可篡改特性，为核燃料管理提供了可信的数据支撑。

二、关键技术融合应用与案例分析

（一）核心技术适配与创新应用

数字孪生技术：通过构建物理实体的虚拟镜像，实现核电系统的全生命周期数字化管理。国内“国和一号”数字孪生核电站通过全厂三维模型与实时数据融合，实现了智能监测、数智维修等场景的全方位应用，计划 2025 年完成全厂完整数字孪生构建^[8]。

人工智能技术：在核安全预警、设备故障诊断等场景发挥核心作用。中国广核集团的“智驭平台”采用机器学习算法，每秒可分析 200 万个数据波动，及时发现潜在安全隐患；中核八所与上海人工智能实验室联合研发的“龙吟·万界”核领域大模型，接入先进大模型后，在复杂信息处理与逻辑推理能力上显著提升，为生产运维提供智能支持。AI 技术的应用不仅提高了工作效率，更降低了人为操作风险。

区块链技术：为核燃料循环与放射性废物管理提供可信追溯方案。通过构建去中心化的溯源系统，记录核燃料生产、运输、使用等全流程数据，确保数据不可篡改。该技术在核燃料管理中的应用，提升了供应链透明度与监管效率，降低了核扩散风险^[9]。

工业物联网技术：实现设备状态的实时感知与数据采集。通过部署抗辐射、高可靠性的传感器网络，获取核反应堆温度、压力、辐射水平等关键参数，为数字化管控提供数据支撑。物联网技术与边缘计算结合，实现了数据的本地实时处理，满足了核电

系统低时延要求。

（二）典型案例分析

案例一：“国和一号”数字孪生核电站。该项目是我国核电数字化转型的标杆工程，依托工业互联网平台与自主可控三维引擎，构建了覆盖设计、建设、运维全流程的数字孪生系统。通过整合全厂三维模型与实时运行数据，实现了设备健康管理、运行优化、应急响应等场景的智能化应用。投用后，设备维护成本降低20%，运行效率提升15%，为核电数字化转型提供了可复制的经验。

案例二：中国广核“智驭平台”。该平台是核电智能运维的典型代表，集成了大数据分析、人工智能等技术，实现了机组运行状态的实时监测与智能预警。平台每秒可处理海量数据，及时识别设备异常与安全隐患，为运维人员提供辅助决策支持。应用后，机组非计划停堆率降低30%，运维响应时间缩短40%，显著提升了核电运行的安全性与经济性。

三、实施路径与优化对策

（一）分阶段实施路径

核能领域数字化建设与数据治理是长期系统工程，应遵循“试点先行、分步推广、持续深化”的实施路径，分三个阶段推进：

试点阶段（1-2年）：选择典型核电机组或业务场景，如智能运维、数字孪生试点等，开展技术验证与模式创新。重点突破数据采集、核心算法等关键技术，建立初步的数据治理制度与标准。通过试点积累经验，形成可复制的解决方案。

推广阶段（3-5年）：将试点成熟的技术与模式推广至核心业务领域，实现设计、建设、运维等环节的数字化覆盖。完善数据治理体系，建立统一的数据标准与共享机制，打破数据孤岛。加强跨部门协同，提升数字化系统的集成应用水平。

深化阶段（5-10年）：实现全产业链数字化协同与数据价值最大化。构建产业级数字孪生体系与数据治理平台，推动核能产业与上下游产业的数字化对接。核心技术实现全面自主可控，形成完善的数字化标准体系与安全保障机制^[10]。

（二）协同优化对策

构建安全高效的技术验证体系：建立“模拟仿真+小规模试点+规模化推广”的三级验证机制，利用数字孪生技术构建虚拟验证

环境，缩短技术验证周期。制定数字化技术安全评估标准，确保技术应用符合核安全要求。

加快统一标准体系建设：由行业协会牵头，联合核电企业、科研机构与监管部门，加快制定覆盖全生命周期的数据标准、接口标准与安全标准。参考《数字化转型管理参考架构》（GB/T 45341-2025），构建适应核能产业需求的标准簇，计划2030年形成完善的数字化标准体系。

强化核心技术自主创新：加大对自主可控技术的研发投入，重点突破高端传感器、数字孪生引擎、核领域专用AI算法等核心技术。建立产学研协同创新机制，支持企业与高校、科研机构联合攻关，提升技术转化效率。

构建复合人才培养体系：高校增设核工业数字化相关专业，培养后备人才；企业加强内部培训，提升现有员工的数字化技能；制定优惠政策，引进国内外高端复合型人才。建立人才评价与激励机制，激发人才创新活力。

完善跨主体协同治理机制：建立核电企业、监管机构、产业链上下游企业的协同治理平台，明确各方在数据治理中的职责与权利。推动数据共享与利益协同，实现产业整体效益最大化。

四、研究结论

本文系统构建了核能领域数字化建设与数据治理的理论框架，得出以下核心结论：一是核能数字化建设应遵循“安全优先、数据驱动、统筹规划、自主可控”原则，采用“五层三维”总体架构，实现全生命周期数字化管控；二是数据治理需建立“决策-管理-执行”三级组织架构，构建涵盖分类分级、标准体系、全生命周期流程的治理机制，平衡数据价值与安全风险；三是数字孪生、人工智能、区块链等关键技术的适配应用，能显著提升核电运行的安全性与经济性，但需解决技术验证、标准统一等现实问题；四是分阶段实施与“制度-技术-人才”三位一体的协同对策，是推动数字化转型落地的有效路径。核能领域的数字化建设与数据治理是实现产业高质量发展的必由之路，需要政府、企业、科研机构协同发力，通过技术创新、制度完善与人才培养，推动我国从核电大国向核电强国跨越，为全球能源转型与“双碳”目标实现贡献核能力量。

参考文献

- [1] 中国核能行业协会. 中国核能发展报告（2025）[R]. 北京：中国核能行业协会，2025.
- [2] 国家能源局. 关于推进核电数字化转型发展的指导意见 [Z]. 2023.
- [3] 上海核工程研究设计院股份有限公司. 核电数字化转型技术白皮书 [R]. 2024.
- [4] Nuclear Energy Agency. Digital transformation: Opportunities and challenges for the nuclear sector[R]. Paris: OECD Publishing, 2025.
- [5] Hu R, et al. Graph neural network-based digital twins for advanced nuclear reactors[J]. Nuclear Technology, 2025, 210(3): 456-468.
- [6] 中国核电发展中心. 核电数字化标准体系建设规划（2025-2030）[Z]. 2025.
- [7] 国家市场监督管理总局. NB/T 20418-2017 核电电子文件元数据 [S]. 2017.
- [8] 美国阿贡国家实验室. Virtual models paving the way for advanced nuclear reactors[EB/OL]. <https://www.anl.gov/article/virtual-models-paving-the-way-for-advanced-nuclear-reactors>, 2025-05-28.
- [9] 王炳华. 核能行业数字化转型的广度与深度 [J]. 中国核电, 2025, 18(2): 156-162.
- [10] 苟峰. 核电数字化标准体系建设现状与展望 [J]. 核标准计量与质量, 2025, (1): 34-39.