

特色专题

数智赋能:面向 2035 智能核电构架建设与发展战略

叶奇蓁¹, 张雷^{2*}, 郭林², 宋磊², 夏增辉², 淮小利³, 苏罡²

摘要 在全球能源转型与“双碳”目标驱动下,智能核电成为核能产业突破安全与经济性瓶颈的核心路径,而核电安全是智能核电发展的根本,智能控制是智能核电最重要的特性。本文提出以数智化平台为基座,以数智化技术为内核,构建开放协同的核电数智化应用生态,并逐步向核电控制系统进行赋能与融合,构建“安全为基、生态为翼、效能为核”的三位一体智能核电体系。同时,指出未来 10 年智能核电开发的“三步走”规划:3 年内建立完善的智能核电标准体系,5 年内开展工程示范性应用,10 年内形成非安全级智能核电生态建设。本文提出以核电运行安全为根基的智能核电顶层物理构架,并建设具备模块化、流程化、低代码组态化能力的数智化平台,采用“云大物移”、人工智能等数智化技术实现先进感知、一键启停、自主决策等智能化业务,最终形成“平台+业务生态+机理模型+数据驱动+人工智能”的创新驱动模式,为能源安全与核能产业数智化提供方向指引。

关键词 智能核电;数智化平台;设计研发一体化;模块化;流程化;组态式开发

1 核能数智化转型

1.1 政策助力数智驱动能源发展

能源行业智能化是落实“双碳”目标与能源安全战略的关键支点,核能作为清洁能源在保障中国能源安全、推动“双碳”目标中不可或缺。习近平总书记在中俄核能合作项目开工仪式上明确指出,要“推动核能产业与新一代数字技术深度融合,为全球核能创新发展贡献中国智慧”。这一要求正通过核能产业智能化建设加速落地,核能产业的智能化不仅是技术升级,更是构建新型举国体制下核能科技自立自强的战

略支点。

国务院“中央企业人工智能专题推进会(2024)”明确要求:“加快推动人工智能发展,是国资央企发挥功能使命、抢抓战略机遇、培育新质生产力、推进高质量发展的必然要求。要带头抢抓人工智能赋能传统产业机遇,加快构建数据驱动、人机协同、跨界融合、共创分享的智能经济形态”。国家能源局《关于加快推进能源数字化智能化发展的若干意见(2023)》指出:“推动数字技术深度应用于核电设计、制造、建设、运维等各领域各环节,打造全面感知、智慧运行的智能核电厂,全面提升核安全、网络安全和数据安全等保障水平”;《关于推进“人工智能+”能源高质量发展的实施意见(2025)》进一步指出:“围绕核电安全发展,构建核电安全预警、电站运行事件智能溯源分析、应急响应的智能辅助支持系统,开展核工业特种

1. 中国核工业集团有限公司,北京 100822

2. 中国核电工程有限公司,北京 100840

3. 中核控制系统工程有限公司,北京 102401

收稿日期:2025-09-12;修回日期:2025-12-29

基金项目:中国工程院重点咨询项目(2025-HZ-11)

作者简介:叶奇蓁,中国工程院院士,研究方向为核裂变与聚变技术和产业发展战略,电子信箱:gang_su@126.com;张雷(通信作者),研究员级高级工程师,研究方向为智能核电构架和仪控平台,电子信箱:zhang_lei_zhl@163.com

引用格式:叶奇蓁,张雷,郭林,等.数智赋能:面向 2035 智能核电构架建设与发展战略[J].科技导报,2026,44(12):105-113;

doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.09.00056

运维机器人技术攻关,持续推动核电系统的自动启停等技术升级演进,探索人工智能技术助力离子体预测控制、可控核聚变等技术路径,推动核电行业向数据驱动、模型牵引、智能管控的新模式稳步转型”;《“人工智能+”能源高价值场景清单和组织开展试点申报工作的通知(2026)》进一步明确“核电运行智能监测、分析和辅助决策,核电机组自动启停与人机协同”等5个核电高价值场景。

核能产业作为典型的流程驱动型与核心装备密集型产业,既是核安全与辐射安全监管的重点领域,也是先进感知、一键启停、自主决策等数智化技术手段发挥关键作用的主阵地。此类数智化技术在核能领域的拓展性应用,将为核电全产业链效能提升与安全边界拓展提供系统性支撑。

1.2 智能核电发展的必然性

全球气候危机加速能源结构深度调整,国际能源署(International Energy Agency, IEA)发布《2024年世界能源展望》(World energy outlook 2024)^[1]、《通往核能新时代的道路》(The path to a new nuclear era)^[2]指出,2050年全球核电装机容量预测增长近1倍,以满足碳中和需求。“华龙”机型作为中国先进成熟商用机型,单台机组年发电量超100亿kW·h,相当于减少燃煤312万t、二氧化碳排放816万t,未来10年“华龙”机型将作为主力机型改善国家能源发展结构,推动新一代“数智华龙”成为时代需求。

同时,核电应积极响应党的二十大提出的到2035年基本实现社会主义现代化的总目标,将第四次工业革命信息技术与工业深度融合,以国家发展战略提出的推进智能制造为主攻方向,直面核电的信息化、智能化建设引发的全新机遇和挑战,稳步开展智能核电发展“十五五”规划。智能核电是新一代数智化技术与先进核能技术的结合,是具备更高核安全、发电高效、运营高人效、业务高可用的核能系统。

“数智华龙”作为智能核电的主力商用堆型,其控制系统的智能化是“数智华龙”先进性的最关键的技术特征。通过工业互联网平台技术、物联网技术、先进通信技术、人工智能技术、大模型技术等助力核电控制系统技术发展,可为“数智华龙”打造坚实基础。

核电控制系统作为核电大脑和神经中枢,在核电发展的历史浪潮中,20世纪80年代,秦山一期、大亚

湾核电站正式开启了模拟控制系统的时代;90年代,岭澳一期进入模拟与数字混合控制系统的时代;2000年初,田湾核电站建成了全球首个全数字化控制系统核电站,开启了核电控制系统全数字化浪潮;2010年后,全国产自主化集散控制系统(distributed control system, DCS)控制系统面世,实现了核电控制系统自主可控;2020年后,以DCS+现场总线控制系统(fieldbus control system, FCS)的先进总线控制系统在海南3、4号核电试点应用,步入了一个新的阶段。在中国核电大发展的40年期间,核电控制系统以10年为一代,逐步完成了从国外引进模拟电站到自主可控数字化电站的转型。未来10年,数智化技术将成为核电控制系统迭代的新动力。

1.3 智能核电控制系统安全发展重要性

核电控制系统作为纵深防御体系的核心载体,其特殊性不仅体现在贯穿预防、控制、缓解、应急、恢复五层防御机制,更在于其需满足核安全级强制认证、设备多重冗余可靠性、控制策略多样性、人因工程高度适配性及网络安全零容忍等远超常规工业控制系统的严苛要求^[3]。

数智化技术在核电控制系统的应用具有显著的双重效应,应在确保数智化技术可靠、安全的前提下,构建“安全验证-场景试点-标准固化-规模推广”的递进式发展框架,在确保纵深防御体系完整性的前提下,实现数智化技术向控制系统的精准赋能。在安全验证阶段,需通过“全数字仿真+硬件在线自检”测试验证数智化功能的可靠性;在场景试点阶段,选择低风险、可隔离的应用场景进行小范围验证;在标准固化阶段,建立核电数智化功能的安全分级认证体系;最终在规模推广阶段,确保数智化能力与纵深防御体系的深度协同,在提升运行效率的同时,守住“不发生堆芯损坏、不发生放射性泄漏”的核安全底线。

2 智能核电技术革新

在核电数智化转型的关键历史节点,技术架构的革新不仅是应对全球能源变革的战略抉择,更是破解行业深层次矛盾的必然路径。具体而言,从顶层物理框架设计、数智化平台生态建设、关键使能技术赋能3个方面,构建“安全为基、生态为翼、效能为核”的三

位一体智能核电体系,系统性推动核电产业升级。在安全维度,以新型智能核电架构构筑核安全防线,在保障反应堆本质安全的前提下,通过冗余设计、故障自诊断等技术提升数智化应用的安全可靠性;在生态维度,以核电数智化平台为载体,打破产业链数据壁垒,构建开放协同的数智化应用生态,促进技术、数据、业务的深度融合,最终形成“安全可控、效能卓越、生态繁荣”的核电智能化发展格局;在效能维度,依托“云大物移”等先进成熟的关键使能技术,推动数智化应用深度赋能核电全生命周期,从设计研发的协同优化到运维检修的精准决策,实现效率跃升与成本优化。

中国智能核电的革新,也应充分借鉴美、法、俄等核电强国的实践经验并规避其短板:美国 NuScale SMR 聚焦模块化与数字化深度结合,但存在生态开放性不足、跨平台数据互通壁垒等问题;法国电力集团(Electricité De France, EDF)以 AI 运维升级现有机组,有效降低维护成本,却缺乏针对新一代智能核电的系统性顶层设计;俄罗斯采用“核电装备+数字技术”跨界融合模式,但其数智化核心技术自主可控程度不足。基于此,中国将走出独具特色的智能核电道路:通过强化顶层规划,开展智能核电正向设计;实现全生命周期数据贯通,构建全产业链协同生态;坚持安全与效能统筹,建立递进式发展框架;以核心技术自主可控为支撑,同步推进标准体系建设;依托庞大核电规模,形成“试点-迭代-推广”的良性循环。

2.1 顶层物理框架

智能核电应以核电运行安全为根基,通过设置数智化系统提高岗位高人效、生产高能效、设备高可用、操控便易性、运营高效性。同时,在信息泛在感知全面数字化的基础上,实现数据互联互通,消除数据孤岛,实现数据共享,挖掘数据价值,实现数据为业务高效赋能;利用先进智能传感技术、信息通信技术、智能软测量检测、顺控/组控/一键启停控制、信息管理技术,逐步实现核电全自动、状态自感知、工况自学习、操控自决策、命令自执行、环境自适应、运行自趋优、故障自恢复、人机协同能力;采用工业互联网平台技术、物联网技术、先进通信技术、人工智能技术、大模型技术建设核电数智化平台,基于模块化、流程化、组态化的设计方法,实现智能化工业应用软件全生命周期的设计、研发、测试、集成、部署功能^[4-5]。

在核电全面推进网络化、信息化、智能化的大背景下,网络安全是保障核电安全的必要条件,不能因采用各类先进技术而引发核电网络安全风险。2025 年 1 月 1 日起正式施行的国家发展改革委 27 号令《电力监控系统安全防护规定》进一步规定了防护区域按照安全等级从高到低划分为生产控制区(安全Ⅰ区和安全Ⅱ区)和管理信息区(安全Ⅲ区和安全Ⅳ区)。对电力一次系统(设备)进行实时监控的业务模块应当按照安全Ⅰ区防护要求部署;与安全Ⅰ区的业务模块交互紧密,对电力生产和供应影响较大但不直接实施控制的业务模块应当按照不低于安全Ⅱ区防护要求部署;与电力生产和供应相关,实现运行指挥、分析决策的业务模块应当按照不低于安全Ⅲ区防护要求部署;其他业务模块应当按照不低于安全Ⅳ区防护要求部署^[6]。

综合考虑,核电应加强网络安全建设,可将数智化系统分为智能控制系统和智能运营管理系统,智能控制系统可进一步细分为智能运行控制系统(安全Ⅰ区)、智能辅助监控系统(安全Ⅱ区)。顶层物理框架如图 1 所示。

2.2 数智化平台

平台是业务功能的载体,核电控制系统平台是核电控制系统功能实现的技术底座,从早期的模拟控制系统,到现在已经形成了以 DCS 为主、FCS 为辅的平台技术布局。同时,基于 IT 技术、工业互联网平台技术发展起来的数智化平台,采用微服务、容器化技术可用于承载大数据、人工智能、物联网等先进功能,数智化平台在核电智能化领域有广阔的应用前景^[7]。

相较于传统 DCS/FCS 平台,数智化平台以工业服务器为核心处理单元,具有更强的计算能力、更多的存储空间、更大的网络带宽,除可进行常规逻辑、机理分析运算外,还能进行大数据分析、AI 模型推理、语言大模型等功能应用。同时,数智化平台采用模块化、流程化、低代码组态化的开发模式,持续开展业务生态建设,具有较强的可扩展性。

目前,核电数智化平台可优先在智能辅助监控系统、智能运营管理系统进行试点应用、迭代发展。未来通过 4 步走,将逐步整合 DCS 平台、FCS 平台、核电数智化平台,形成新型智能核电控制系统平台,并承载智能业务直接赋能核电控制^[8]。智能核电控制系统平台的发展规划如图 2 所示。

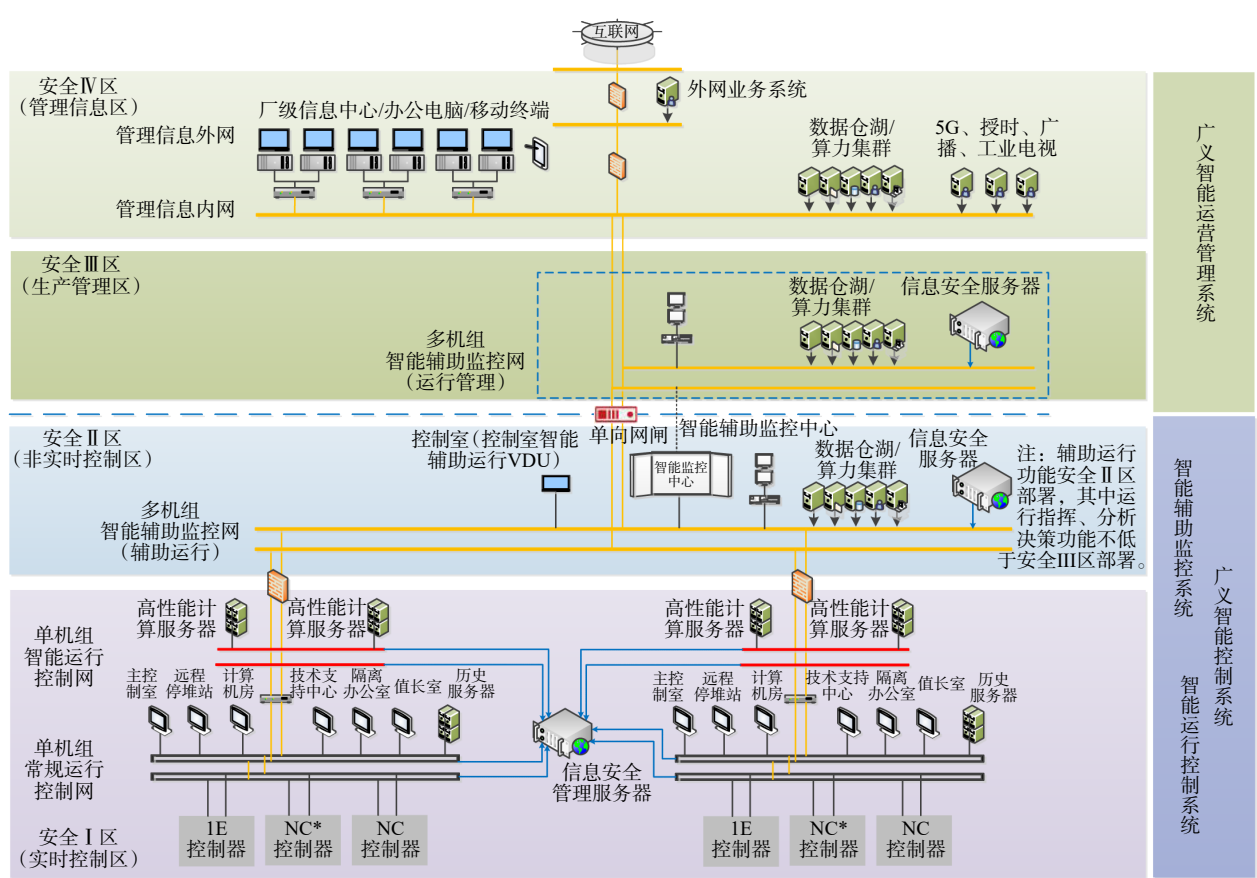


图1 智能电厂顶层物理框架设计

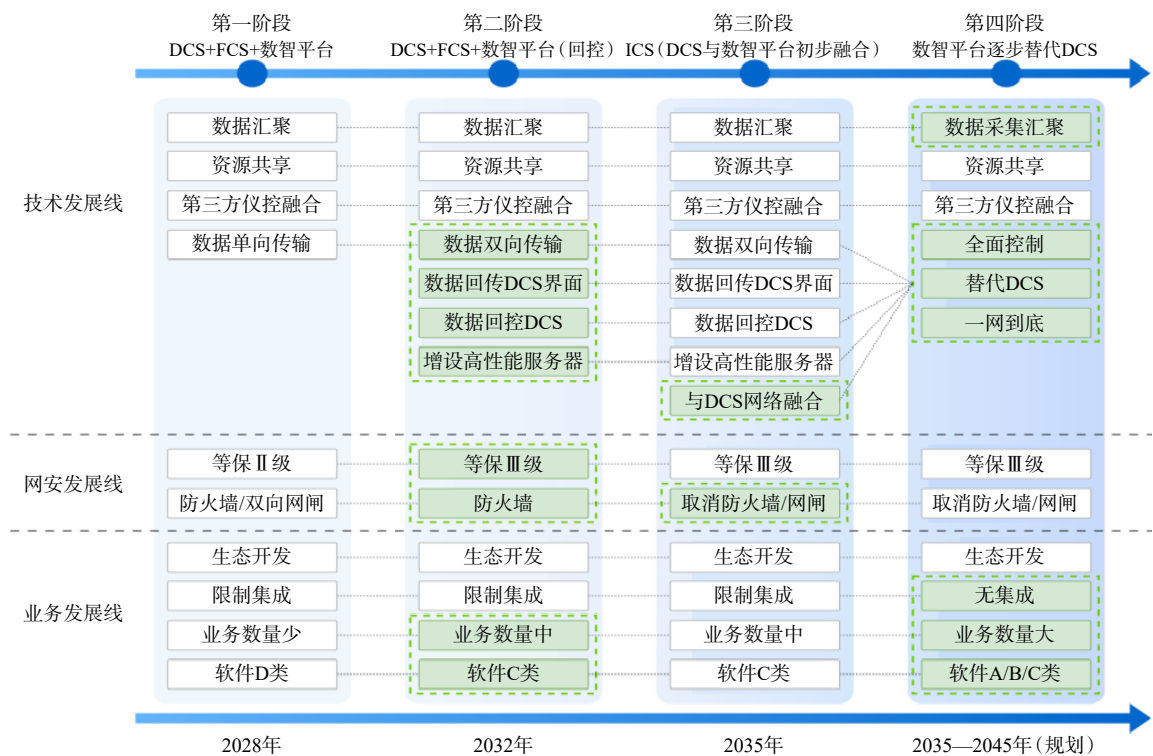


图2 智能核电控制系统平台发展规划

2.3 关键数智化技术

数智化技术是数字化与智能化深度融合的产物,是支撑智能核电的使能技术,如图3所示,从概念、目标、特征、技术4个层次逐步分析智能核电关键要素,最终分解出关键数智化技术。概念层提出智能核电发展的核心理念和方向,是发展核电数智化技术的起点和终点;目标层提出智能核电主要设计目标,是核心理念的具体化体现;特征层是实现智能核电目标应具备的智能化功能和能力,也是智能化特征的具体外在体现;技术层是实现智能核电功能的支撑数智化

技术,包括主体技术和保障技术。随着对数智化技术需求的不断挖掘,以及数智化技术的不断发展,在这个4层模型下,可逐步调整和细化智能核电的目标、功能和技术,相互之间的关联可以逐渐明晰、界定、动态发展。

其中,技术层位于智能电厂4层模型的最底层,是实现智能电厂上3层的基础。支撑技术是指为了实现电厂智能化特征而采用的基础技术,即“赋能”技术;保障技术是指为了保证智能化技术在核电厂的适用性所涉及的技术。

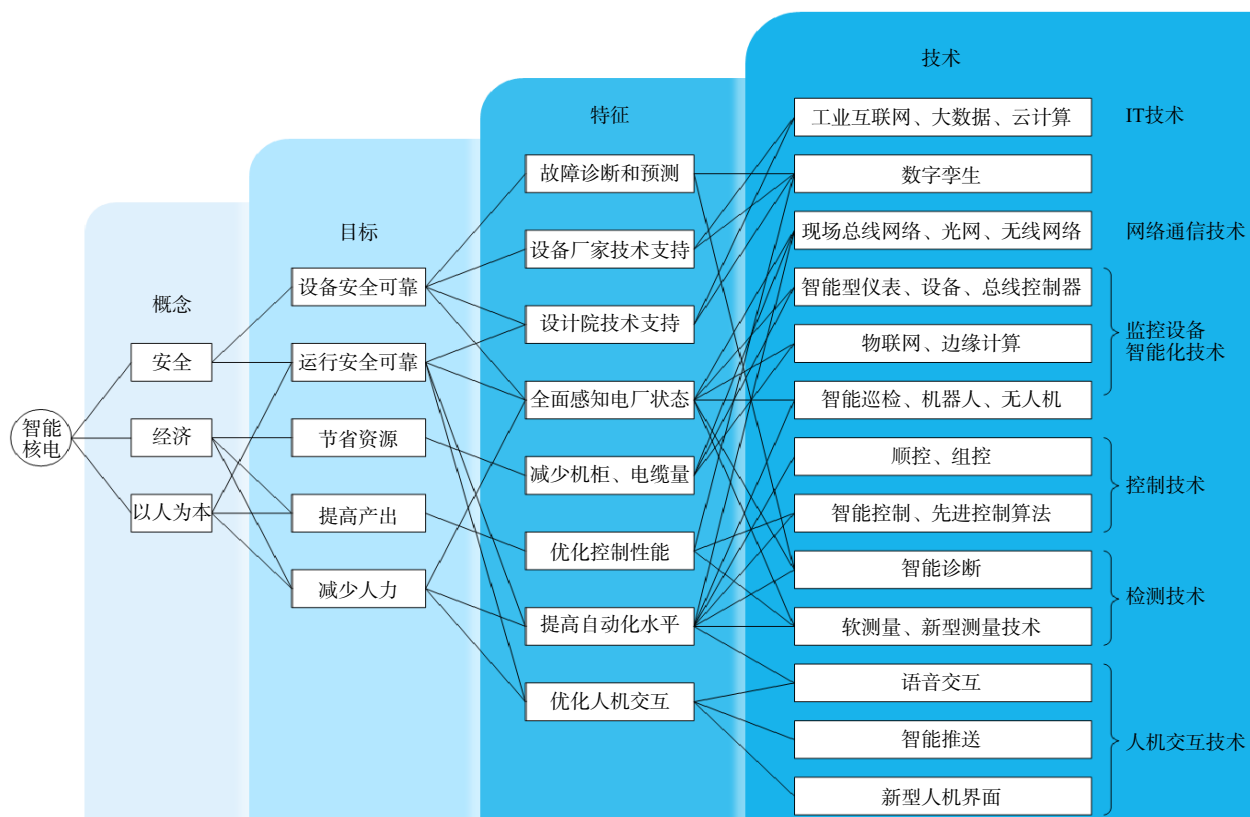


图3 智能核电关键数智化相关技术

3 智能核电数智化系统生态建设

核电数智化系统是基于顶层物理构架搭建的数智化平台承载数智化业务功能的综合系统。核电数智化系统应构建开放协同的核电数智化应用生态,促进技术、数据、业务的深度融合,融合是一个持续优化和迭代的过程。

3.1 数智化系统规划建设

3.1.1 10年规划

未来10年,核电数智化系统初步构建智能化工业应用软件原生开发的模块化、标准化、流程化生态

体系,并依托于在建工程项目逐步承载数据汇聚、资源共享、业务生态建设、运行环境支持4大类功能。首先,可实现生产控制大区各类生产及智能化相关数据的互联互通,消除数据孤岛;其次,可提供开放的数据仓湖,实现数据共享,提高数据利用的价值;再次,可基于工业级的研发功能实现智能运行、控制应用的原生开发,在保证安全、可靠的基础上进一步推动工业软件开发的体系化、标准化、流程化建设;接着,基于非安全级的运行环境功能,可靠承载智能化非安全级运行控制功能;最后,可实现数智化生态网络与常

规控制系统的融合,提供智能监控功能,为运行控制提供直接或间接技术保障^[9]。

3.1.2 长期规划

核电数智化系统一方面应持续加强模块化、标准化、流程化建设,扩容数智化平台功能规模与适用范围,另一方面与控制平台逐步融合,承载控制类功能。设立以下长期发展目标:

1) 设计-建造-运维-退役数据贯通:数智化系统应实现核电全生命周期的数据汇聚,为人工智能等数智化技术提供充足的数据资源,可为后续物理电站向孪生电站发展提供必要的数据基础^[10]。

2) 数智化设计-研发-运行一体化:数智化平台应进一步实现工程设计、软件开发、运行部署三位一体的模式,减少工程设计与软件研发工作接口,通过自动化方式提高设计、研发转化工作效率,减少过程转化人因失误。

3) 数智化功能体系化、标准化建设:数智化业务软件应进一步促进软件开发的体系化、标准化建设,通过持续提升模块化、流程化、组态化能力以简化业务软件的开发流程,提高开发效率。

4) 承载核级控制功能:数智化系统应通过提升数智化平台的可靠性,进一步从非安全级功能逐步承载A/B/C类核级功能,实现智能化业务功能向核心控制领域的赋能。

3.2 数智化平台核心建设

为实现智能核电数智化系统未来10年发展规划,数智化平台应从自主可控、异构数据采集、知识库建设、数据资产管理、多模态智能化发展几个方面进行技术突破与建设。

1) 基于自主可控的平台技术。优先基于自主可控的处理器构架实现核电专用平台的建设,形成“工业平台+工业APP”生态模式,提供统一的智能化工业应用软件开发、运行环境;采用云原生、分布式及大数据等技术,优先支持核电控制领域机理模型和智能模型融合构建、运行及管理,满足多样化的工业数据计算与分析场景需求。

2) 多工业协议数据高并发采集及转化技术。数智化平台应能实现核电现场设备和工控系统等多源异构数据在工业网络的互联互通,实现高效、安全可控的工业数据高并发采集及转化技术,满足多工业协

议数据的统一接入需求。

3) 核电属性的算子、算法、模型、用户界面(user interface, UI)组件库。通过开展基础算子、数据交互、数据预处理、数学计算、智能算法及专用模型等类型算子、算法、模型库、UI组件库建设,提高平台功能的普适性,满足数智化工业应用软件的基础开发要求。

4) 基于数据仓湖的数据资产管理技术。响应国家大数据战略,通过加强核电控制领域数据资产管理与利用、夯实数据资产基础建设、支撑业务数字化创新推进核电数字化转型。利用核电控制领域丰富的数据资源构建工业数据仓湖,运用工业大数据和数据资产管理技术研制数据资产管理软件。

5) 构建支持多模态交互的软件开发和运行管理智能体。通过大模型开展大规模训练数据、参数和文本,形成强大的生成能力、泛化能力和自然交互能力,基于大模型构建支持多模态交互的软件开发和运行辅助管理智能体。

3.3 数智化业务生态建设

智能核电数智化系统的生态建设需以开放协同为核心,构建覆盖全产业链的数字化协同网络,打破设计、制造、运维等环节的数据壁垒,形成全生命周期一体化能力。通过整合产业链主体的数据资源与业务需求,实现设计模型、设备参数、施工记录与运维数据的贯通共享,推动跨环节协作效率提升;同时需建立行业级知识共享机制,集成故障案例、专家经验等非结构化数据,支撑组态式开发与微应用快速迭代,形成“平台+业务生态+机理模型+数据驱动+人工智能”的创新驱动模式。

其中,人工智能(artificial intelligence, AI)作为数智化技术的前沿技术,在智能核电业务生态建设方面有很大发展前景,根据国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)于2025年发布的《在核电行业部署人工智能应用的考虑》^[11]提出的人工智能和机器学习在核电中的潜在应用包括如下诸多方面。

教学:大型语言模型(large language models, LLMs)可应用于核能领域的教学与学习活动。

监测和诊断:通过实施AI驱动的监测与诊断,可实现安全性提升、成本降低、节省时间、避免发电损失赋能。

文本分析: LLMs 在处理电站文档方面具备多种能力, 包括信息洞察提取、摘要生成、语义搜索和报告撰写等。

无损检测检查辅助: 利用 AI 技术可在现场检查过程中, 为检查人员提供增强型数据以支持实时评估。

故障诊断和预测性维护: AI 技术可用于对核电厂系统和设备的运行状态进行持续监测, 从而实现潜在问题的快速发现与设备健康管理。

运营和决策支持: 基于 AI 技术的运行决策支持系统, 可利用实时数据与预测模型优化运行策略, 从而提高运行效率。

操纵员人因性能优化工具: AI 技术可用于提升决策效率和操纵员的响应能力。基于数据驱动的时间序列预测模型, 结合操纵员当前的操作意图与电厂的历史运行数据, 可以为操纵员提供有关运行风险的辅助信息。

传感器状态在线监测: AI 技术可用于传感器状态的在线监测, 即在核电厂运行过程中对传感器精度、响应时间进行实时估算, 并对其健康状况进行诊断。

核保障应用: AI 技术还在放射性物质特性识别、散装核材料处理设施、核保障检查与识别核燃料组件中潜在转移行为等方面发挥作用。

操纵员行为、可靠性分析与改进中的人工智能应用: 在人因可靠性分析和概率风险评估模型中, 可以借助 AI 技术得到加强, 以确认操纵员是否正确执行了规程化的事故缓解策略。

目前, 人工智能已在核电智能运行领域开展了探索研究, 如基于人工智能的核电智能巡盘辅助传统人工巡盘方向的研究, 基于人工智能在核反应堆热工水力预测方面的探索性分析^[12]。

4 关键技术挑战与对策

4.1 技术瓶颈和应对措施

1) 数智化平台核级认证。数智化平台目前暂不承载安全级功能, 也将无法承担核电重要设备的核级功能, 其为核电赋能的空间受到较大限制; 随着数智化技术的逐渐成熟, 数智化平台应遵循《核动力厂设计安全规定》(HAF 102)、《核动力厂仪表和控制系统设计》(HAD 102-10)等核安全级标准开展平台设计,

参照《核电厂系统和软件的验证和确认》(NB/T 20448)开展验证和确认工作, 逐步形成可执行 C 类/B 类/A 类功能的软件平台, 最终满足各类核级功能的开发运行需求。其中, 人工智能功能因具有特殊性, 其验证和确认方法区别于传统数字化仪控系统, 开展相关工作需重点关注 5 个方面: 一是数量质量评估, 涵盖训练数据与测试数据的有效性; 二是算法评估, 包括算法的正确性、性能、可解释性及鲁棒性等; 三是模型性能验证, 聚焦模型的泛化能力、稳健性与安全性; 四是系统集成与交互测试, 确保人工智能功能人机交互的友好性和有效性、与传统系统的适配集成及多模型协同运行效果; 五是迭代更新测试, 随着新数据的持续累积, 对人工智能功能开展全周期性能监测与优化。

2) 人工智能算法及模型可靠性认证。数据驱动、样本学习等人工智能技术与机理模型存在本质差异, 其推导计算过程与决策结论的可论证性、可追溯性较弱; 同时, 核电复杂工况下非瞬态工况、事故工况的样本资源匮乏, 智能算法长期面临有效数据不足导致的计算偏差问题。对此, 需从 4 方面构建保障体系: 一是建立全流程风险防控机制, 强化人工智能功能各环节的验证与确认, 提升功能透明性与可解释性; 二是设置容错、冗余、退防、隔离多重保障, 确保人工智能出现故障或失效时不影响核电基本安全功能; 三是加强数据可用性、适用性评估, 同步开展模型准确性、稳健性等核心性能验证; 四是通过技术优化提升模型泛化能力, 增强其对新数据、新任务、新场景的适应水平。

3) 数据互通共享与网络安全风险。万物互联与数据互通虽能显著拓展智能技术的应用场景、提升使用便捷性, 但随着核电设备网络接口数量激增, 网络攻击、数据泄露等安全风险也随之加剧。而按网络安全防护规定及等保要求实施的隔离防护措施, 可能对数据交互的速度、质量与效率产生一定影响, 进而制约先进数智化技术的应用成效, 网络安全已成为智能核电发展的关键制约因素。对此, 需严格遵循 2026 年 1 月 1 日修订生效的《中华人民共和国网络安全法》要求, 建立全流程人工智能风险监测评估体系, 强化安全监管与防护能力建设, 在保障数据安全与网络稳定的前提下, 推动数智化技术安全有序应用。

4.2 工程验证和安全审查

智能核电工程建设并非一蹴而就,需遵循循序渐进、迭代发展的总体路径。一是持续提升数智化技术的可靠性、成熟度与精准性;二是强化智能化软件全流程测试与验证,筑牢技术运行安全根基;三是优化完善核电操作规程,实现常规运行规程与数智化规程平稳衔接,构建双重安全保障体系;四是严格落实安全审查要求,在保障核设施安全稳定运行、有效防范核事故风险的前提下,坚持包容审慎监管,对各类数智化功能实施分类分级管控,按照鼓励开展、审慎推进、严格管控的差异化策略,有序拓展工程应用场景、稳步扩大功能落地范围;五是优先在核电非安全相关领域开展数智化技术试点应用,以试点牵引逐步

赋能机组智能运行与智能控制。

随着前期工程的试点应用和功能验证,数智化应用技术将更加成熟、可靠,未来也将从“对主控操纵员间接辅助运行支持”向着“数据回传控制系统直接参与运行控制”的方向发展。

5 10 年战略规划

5.1 里程碑目标

未来 10 年,提出智能核电“三步走”战略规划目标:3 年内建立完善的智能核电标准体系,5 年内开展工程示范性应用,10 年内形成非安全级智能核电生态建设(表 1)。

表 1 智能核电“三步走”战略规划目标

时间节点	战略目标	标志性成果
3年	智能核电标准体系建设	构建核电网络构架、智能化功能构架、操作规程、网络安全、人因工程等标准体系
5年	工程示范性应用	数智化系统首次在核电应用,解决数据孤岛,实现数据互通共享,向操纵员提供间接辅助运行支持
10年	非安全级功能生态建设	数智化系统实现数据回传常规控制系统,参与直接运行控制功能

5.2 政策和产业协同

智能技术产学研用的发展迭代过程,应推动多部门、多机构联动,提供政策支持,形成院校、制造单位、工程设计院、业主单位之间的产业协同,发挥各方优势,贯彻“需求牵引、目标导向、统筹规划、统一技术、迭代发展”的战略方针。

通过开展系统顶层设计、数据测点设计、数据采集设计、数据存储共享、数据清洗/挖掘、系统应用、系统/产品设计优化,一方面可实现系统级工程设计大闭环良性迭代循环;另一方面可实现“科研—工程落地—再科研”产品级小闭环产品研制与良性迭代发展。

5.3 经济效益提升

数智化应用应贯穿核电全生命周期,在提高电厂可利用率、延长电厂设计寿期、降低厂用电率等方向赋能,在严守核安全底线的前提下,实现上网发电量提升与发电成本优化。具体目标包括:通过提升电厂可利用率,达到行业先进水平;通过智能控制系统与自动化技术提升运行操控效率,稳步推进“少人监控、少人值守”模式落地;依托预测性维护技术减少 40% 以上非计划停机,显著延长设备平均无故障运行时

间;结合机组延寿技术与 IAEA 长期运行安全标准提升电厂设计寿期,稳步向“百年核电”的长远目标迈进。

6 结论和展望

在全球能源转型与“双碳”目标的驱动下,智能核电已成为核能产业突破安全性与经济性并重的瓶颈的核心路径。核电安全作为发展的根本前提,与智能控制这一核心特性的深度融合,构成了智能核电的技术内核。支持数据共享、组态式开发、算法复用等功能的数智化平台作为可靠技术基座,采用工业互联网、物联网、先进通信、人工智能、大模型等数智化技术构建数智化业务生态,助力数智化系统与核电控制系统的融合,智能核电实现了全链条效率的显著跃升,为核电产业的高质量发展提供了系统性解决方案。未来 10 年“三步走”战略(智能核电标准体系建设、工程示范性应用、非安全级功能生态建设)的提出,标志着我国核电产业正从技术追赶向规则引领加速迈进,其技术方向与实践成果将为国家能源安全与核能产业数字化提供重要的战略指引。

面向未来,智能核电发展需聚焦3大方向:标准引领——依托自主技术体系构建国际标准,突破关键领域技术壁垒;技术融合——深化人工智能与大模型等技术在先进感知、一键启停、自主决策或辅助决策等领域的应用;生态协同——建设开放创新平台,推动“平台+业务生态+机理模型+数据驱动+人工智能”的核电产业新生态。同时需系统性应对网络安全与地缘政治挑战,通过自主创新与国际协作,确立中国在全球核电智能化进程中的核心地位,为能源转型提供战略支撑。

参考文献 (References)

- [1] International Energy Agency. World energy outlook 2024[R]. Paris: International Energy Agency, 2024.
- [2] International Energy Agency. The path to a new nuclear era[R]. Paris: International Energy Agency, 2024.
- [3] 国家核安全局. 核动力厂仪表和控制系统设计: HAD102/10—2021[S]. 北京: 国家核安全局, 2021.
- [4] 赵俊杰, 冯树臣, 孙同敏. 人工智能火电厂和智慧企业[M]. 北京: 中国石化出版社, 2020.
- [5] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 智能火电厂技术要求: GB/T 44770—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [6] 中华人民共和国中央人民政府. 电力监控系统安全防护规定[EB/OL]. [2025-09-10]. https://www.gov.cn/gongbao/2025/issue_11806/202501/content_6999383.html.
- [7] 刘吉臻. 支撑新型电力系统建设的电力智能化发展路径[J]. 能源科技, 2022, 20(4): 3-7.
- [8] 刘吉臻, 胡勇, 曾德良, 等. 智能发电厂的架构及特征[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6463-6470.
- [9] 国家能源局. 智能电厂设计规范: NB/T 11020—2022[S]. 北京: 中国计划出版社, 2023.
- [10] 叶奇蓁, 苏罡, 黄文, 等. 新质生产力推动核电高质量发展的实践路径研究[J]. 科技导报, 2024, 42(12): 17-26.
- [11] Agency International Atomic Energy. Considerations for deploying artificial intelligence applications in the nuclear power industry[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2025.
- [12] 章静, 王明军, 田文喜, 等. 人工智能算法在核反应堆热工水力预测分析中的初步探索[J]. 核动力工程, 2025, 46(2): 127-140.

Digital-intelligence empowerment: Architecture construction and development strategy of smart nuclear power towards 2035

YE Qizhen¹, ZHANG Lei^{2*}, GUO Lin², SONG Lei², XIA Zenghui², HUAI Xiaoli³, SU Gang²

1. China National Nuclear Corporation, Beijing 100822, China
2. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China
3. China Nuclear Control System Engineering Co., Ltd., Beijing 102401, China

Abstract Driven by the global energy transition and the "dual carbon" goals, intelligent nuclear power has become the core path for the nuclear energy industry to break through the bottlenecks in safety and economy. Nuclear power safety constitutes the fundamental prerequisite for the development of intelligent nuclear power, while intelligent control stands as its most crucial feature. This paper proposes constructing an open and collaborative digital-intelligent application ecosystem for nuclear power, with the digital-intelligent platform as the foundation and digital-intelligent technologies as the core. It aims to gradually empower and integrate with nuclear power control systems, thereby establishing a trinity intelligent nuclear power system characterized by "safety as the foundation, ecology as the wing, and efficiency as the core". Meanwhile, it puts forward a "three-step" plan for the development of intelligent nuclear power over the next decade: establishing an improved intelligent nuclear power standard system within 3 years, launching engineering demonstration applications within 5 years, and completing the construction of a non-safety class intelligent nuclear power ecosystem within 10 years. The paper presents a top-level physical architecture of intelligent nuclear power rooted in nuclear power operation safety, and develops a digital-intelligent platform with modular, process-oriented, and low-code configurable capabilities. By adopting digital-intelligent technologies such as cloud computing, big data, the Internet of Things, mobile Internet, and artificial intelligence, it realizes intelligent services including advanced perception, one-click start-stop, and autonomous decision-making. Ultimately, an innovation-driven model of "platform+business ecosystem+mechanistic model+data-driven+artificial intelligence" is formed, providing directional guidance for energy security and the digital-intellectual transformation of the nuclear energy industry.

Keywords intelligent nuclear power; digital-intelligent platform; integrated design and R&D (Research and Development); modularization; process-oriented; configurable development ●



(责任编辑 赵庆圆)