华龙一号持续改进与压水堆核电技术展望

邢 继,徐思敏,袁 媛,李鸣谦,徐国飞
(中国核电工程有限公司,北京 100840)

摘要: 在以人工智能技术应用等为代表的新一轮工业革命蓬勃发展的背景下,为实现“双碳”目标与新能源技术发展相互促进,国家制定了民用核能“积极、安全、有序”的发展策略。作为成熟可靠的核能技术,压水堆在今后相当长的阶段仍具有广阔发展前景,但也面临着诸多问题与挑战。本文通过介绍我国自主研发的第三代压水堆核电技术——华龙一号的技术特征与持续改进情况,分析了压水堆技术在安全性、经济性等方面面临的挑战,并结合人工智能技术的发展现状与在核电领域的应用实践,展望人工智能技术在压水堆技术领域的未来发展。

关键词: 华龙一号;压水堆技术;人工智能技术;展望
中图分类号: TL421.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2024)S2-0362-07
doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0604

Continuous Improvement of HPR1000 and Outlook on PWR Technology

XING Ji, XU Simin, YUAN Yuan, LI Mingqian, XU Guofei
(*China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing* 100840, *China*)

Abstract: Under the background of the booming new industrial revolution, which is characterized by artificial intelligence (AI) technology, China has determined to develop the civil nuclear energy in a positive, safe and orderly way to achieve the mutual promotion of the “carbon peaking” and “carbon neutrality” goals and the new energy technology development. As a kind of mature and reliable nuclear energy technology, the pressurized water reactor (PWR) technology still has broad development prospects over a long period in the future, despite plenty of problems and challenges faced. The technical features of HPR1000, a self-developed third-generation PWR technology in China is presented in this paper, and its continuous improvements are summarized and the challenges on safety and economy are analyzed. Combining the development status of AI technology with its application practices in the nuclear power energy field, an outlook on the future development of AI technology in the PWR technology field is provided.

Key words: HPR1000; PWR technology; artificial intelligence technology; outlook

在全球推动能源绿色转型,我国全面推进落实“碳达峰、碳中和”目标的时代背景下,核电作为一种发电稳定可靠、清洁低碳、安全高效、可大规模替代化石能源的基荷电源,在各国能源结构的布局中具有广阔的发展前景[1]。截至2024年6月,全球运行核电机组413台,装机容量374 671 MWe[2],其中我国运行核电机组56台(不含台湾地区),装机容量58 218 MWe[3]。随着近年

收稿日期: 2024-08-09;**修回日期:** 2024-08-18

来全球核电迎来重启热潮，许多国家重新审视核电在清洁能源转型中的作用，如法国计划新建14座核反应堆，英国计划到2050年将核电占比提升到25%[4]。同时，小型模块化反应堆（SMR）正成为国际核电发展的新方向，美国、俄罗斯、中国等国都在积极推进SMR技术。此外，国际热核聚变实验堆（ITER）项目的推进也为未来清洁能源提供了新的可能性。核电技术未来的创新发展，重点考虑的因素主要包括安全性、经济性以及环境友好性。在众多核电堆型中，压水堆具有功率密度高、结构紧凑、安全易控、技术成熟、造价和发电成本较低等特点[2]，成为后福岛时代仍被广泛采用的成熟商用核电堆型。从核电起步发展至成熟商用、再到可批量化建设需要历经较长的工业化与技术迭代过程，在大力发展第4代核电技术的同时，压水堆仍需要不断地发展进步，以满足当前能源结构布局需要和更高的安全经济运行要求，预期到21世纪末，压水堆仍将是全球核电采用的主力堆型。

在这一全球核电发展与技术创新的大背景下，我国核电产业也在积极推进自主创新，取得了显著进展。作为世界上最大的核电建设市场之一，中国在核电技术研发和工程实践方面都达到了新的高度。特别是在压水堆技术方面，我国已经实现了从引进、消化、吸收到自主创新的跨越式发展。我国核电的自主设计、建设始于20世纪80年代的秦山一期30万kW压水堆核电厂，经过30余年的技术发展和持续改进，中国核工业集团有限公司和中国广核集团有限公司共同研发了具有完整自主知识产权的百万千瓦级压水堆核电技术“华龙一号”。华龙一号采用先进的安全设计理念与技术，具有创新性的设计特征，满足最新的安全要求和国际上第3代核电的用户要求[5]。2022年1月1日，华龙一号全球首堆示范工程项目福清核电5号机组并网发电。截至目前，国内外华龙一号在运6台，国内核准、在建20台，占我国核电核准、在建台数的57%[6]。华龙一号是我国当前核电建设采用的主力堆型之一，目前已进入批量化建设阶段，为压水堆核电技术的进一步迭代发展创造了有利条件。

核电技术的发展仍存在一些问题和挑战。针对压水堆核电技术，同时提升安全性和经济性，是制约其发展的关键问题，全球各核电强国都在寻找突破这一关键问题的技术方向，正积极探索人工智能技术在核电厂设计、运营、维护和安全管理中的应用。例如，美国能源部正在推动数字孪生技术在核电厂中的应用，通过创建虚拟反应堆模型来优化运营和维护策略[7]；法国电力公司正在利用机器学习算法分析核电厂设备的运行数据，致力实现预测性维护，以提高设备的可靠性和运营效率[8]；美国通用电气公司和日立公司联合开发的SMR项目正在利用人工智能辅助设计和安全分析，来加速新一代核电技术的开发[9]。这种智慧核电的发展趋势，正在为解决核电技术面临的安全性和经济性平衡问题提供新的思路和方法。近年来随着算力增强、海量数据产生和采集使人工智能技术得到了快速发展，模型和算法不断有新的突破，在许多领域都发挥了前所未有的巨大优势，人工智能有望成为推动压水堆技术发展的新质生产力。因此，本文对在核能电力供应中占主导地位的压水堆技术的发展进行探讨，剖析当前压水堆技术面临的挑战，梳理华龙一号的持续改进方向与进展，并提出关于智慧核电技术未来发展的思考。

1　自主先进核电技术华龙一号的持续改进

1.1　华龙一号示范工程

华龙一号是我国研发的具有完全自主知识产权的百万千瓦级第3代压水堆核电技术，创新性地提出了“能动与非能动相结合”的先进安全设计理念，提出了“整体平衡核安全观”[10]，应用“4个平衡”的系统工程方法和风险指引方法，形成以能动应对基准事故、以非能动应对扩展工况的纵深防御体系，实现安全性与经济性的平衡，采用了177组燃料组件、能动+非能动安全系统、抗商用大飞机撞击双层安全壳为代表的创新技术，使其具备完善的严重事故预防和缓解措施、强化的外部事件防护能力、改进的应急响应能力等先进技术特征，实现堆芯损坏频率（CDF）为3.47×10^{-7}（堆·年）$^{-1}$、大量放射性释放频率（LRF）为8.9×10^{-8}（堆·年）$^{-1}$，比最新核安全法规及国际第3代核电要求好1个数量级。华龙一号型号发展与技术改进历程如图1所示，示范工程核岛及反应堆厂房三维示意图如图2所示。

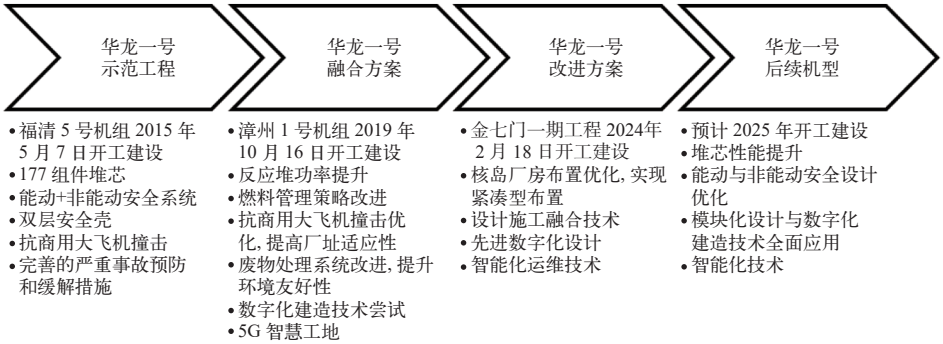


图 1　华龙一号型号发展与技术改进历程示意图

Fig. 1　Diagram of development and technical improvement history of HPR1000

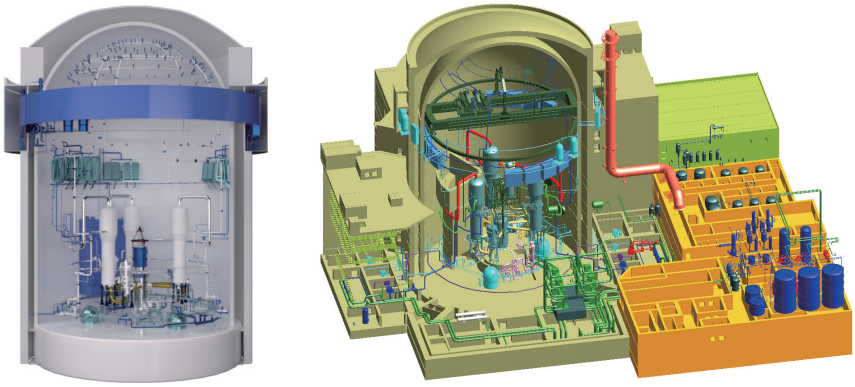


图 2　华龙一号核岛及反应堆厂房三维示意图

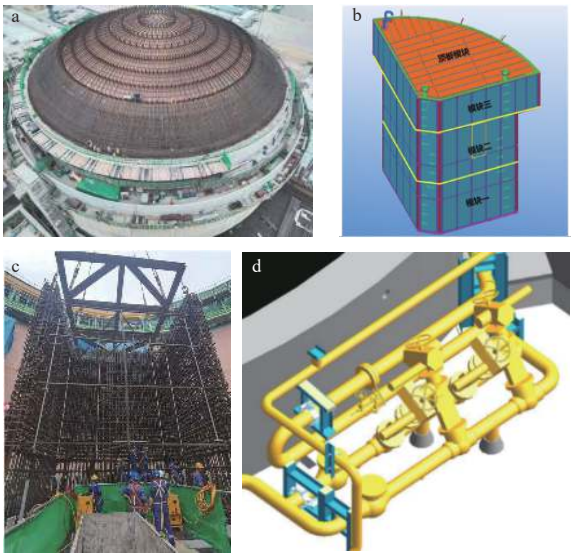
Fig. 2　3D diagram of nuclear island and reactor building of HPR1000

华龙一号全球首堆示范工程项目福清核电 5 号、6 号机组分别于 2015 年 5 月 7 日、2015 年 12 月 22 日开工建设，于 2021 年 1 月 30 日、2022 年 3 月 25 日投入商业运行，于 2023 年 5 月 5 日正式通过国家竣工验收。示范工程项目创造了第 3 代核电首堆 68.7 个月的全球最短建设工期，打破了全球第 3 代核电技术“首堆必拖”的魔咒，是全球唯一按期建成投产的第 3 代核电首堆工程，连续 3 个燃料循环未出现非计划停堆，运行状况良好。福清核电 5 号机组 WANO 综合指数于 2024 年 2 月实现满分，标志着华龙一号生产运营绩效在全球范围表现卓越，充分验证了我国自主第 3 代核电技术的安全性和先进性[11]。海外工程项目巴基斯坦卡拉奇 K2/K3 机组，分别于 2021 年 5 月 20 日、2022 年 4 月 18 日投入商业运行，K2 项目荣获能源国际合作最佳实践案例，首次实现中国第 3 代核电技术独立出口。

1.2　华龙一号融合方案

华龙一号融合方案是中国核工业集团有限公司和中国广核集团有限公司在华龙一号成功示范的基础上，为了实现统一的技术路线及标准，助推华龙一号核电品牌“走出去”，进一步开展的技术融合、优化和再创新，融合方案开启了华龙机型批量化建设的进程，漳州核电一期工程是华龙一号融合方案的示范工程。融合方案反应堆额定热功率提升至 3 180 MWt，改进了燃料管理策略，进一步降低了放射性固体废物量；明确了设计扩展工况并满足最新法规的要求；优化抗商用大飞机撞击技术，进一步提高了厂址适应性；改进废物处理系统，提升了环境友好性。

融合方案示范工程在推进数字化建造技术上进行了有益尝试，在安装施工首次试点采用三维可视化设计成果替代传统的二维设计图，更多的采用了模块化施工、自动化焊接和智慧工地等先进建造技术，采用了钢衬里、钢结构模块化建造方案，模块化技术示意图如图 3 所示，将现场施工工作前置到标准化车间、拼装场地进行，减少施工现场作业量，有利于提高施工质量，保证施工进



a——外壳钢穹顶模板；b——堆腔淹没水池模块；
c——钢筋骨架模块；d——机械模块

图 3　华龙一号融合方案模块化技术示意图

Fig. 3　Diagram of modular technology for HPR1000 integration scheme

度，提升项目整体经济效益[12]。

融合方案示范工程建设了覆盖核电厂岛内、岛外、厂区、生活区的混合型 5G 专网，实现了 5G 智慧工地成功落地，开启了核电工程建造应用 5G 技术的先河，标志着我国的核电工程建造管理迈入了“数字化、可视化、智能化”的全新阶段，“5G+智慧工地”将成为引领未来核电项目建设的新模式。

1.3　华龙一号改进方案

华龙一号改进方案是在吸收首堆示范工程福清核电 5、6 号机组和漳州核电项目的经验反馈基础上，在保持华龙一号总体设计准则、安全目标不变的前提下，以进一步提升经济性和可建造性、推进智慧电厂建设为目标，持续开展的优化改进。改进方案可有效地提升华龙一号品牌的经济性与市场竞争力，开启统筹规划下推动核电数智化转型新的布局，金七门核电项目是华龙一号改进方案的示范工程。改进方案提高了反应堆功率和电厂可利用率，采用紧凑型布置方案，核岛及反应堆厂房三维示意图如图 4 所示，应用设计施工融合技术，在大幅减少土建施工工程量的同时，使现场施工更为便捷。设计初期以建设智慧核电厂为目标，推动落实可迭代发展的核电智能化运维技术。

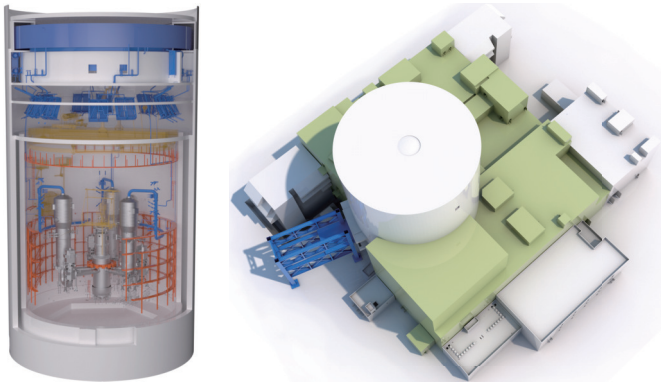


图 4　华龙一号改进型核岛及反应堆厂房三维示意图

Fig. 4　3D diagram of nuclear island and reactor building of improved HPR1000

改进方案示范工程广泛采用了基于三维模型的设计与建造（model based design & construction，MBDC）技术，将设计成果由传统的图纸文档交付模式变为数字化交付模式，不仅提升了设计质量和数据利用率，发挥数据价值，也带来了施工应用技术和施工模式的变革。在研发设计阶段通过数字化仿真模拟复杂与特殊的土建安装施工过程，实现虚拟施工的数字孪生应用，有效提升复杂施工方案的精确性、可行性。开发便捷式管道集成单元（CPIU）模块技术，预计可将华龙一号改进型机组核岛厂房工艺管道预制焊率提升至 70%，极大减少管道现场焊缝数量，从而达到缩短工程建设工期、降低现场人力的需求以及改善现场作业环境的目的。

改进方案示范工程首次提出了智慧核电运维技术开发与应用原则，系统梳理智能化运维需求与业务场景，结合未来发展目标，系统规划实现路径。在确保核电厂安全运行基础上，统筹部署了

数智运维的系统平台，扩展了数据感知范围，为多源异构数据的采集、管理及处理提供了统一解决方案，系统分析了各类设备的安全功能与对电厂运行的影响，制定了核电厂设备智能健康管理目标与技术要求，基于统一的应用开发技术要求，开发并应用了如智能巡盘、设备故障预测、智能故障诊断、智能巡检等智能运维技术，在兼顾支撑生产运营降本增效目标实现的同时，为未来核电智能运维技术的迭代发展奠定了坚实的基础。

1.4 华龙一号后续机型

华龙一号后续机型是瞄准进一步提升安全性与经济性目标研发的自主核电技术，代表了压水堆核电技术的前沿，以其高度的可靠性、智能化和环保友好性，满足了未来低碳能源市场的需求。华龙一号后续机型在华龙一号的基础上，通过技术创新，在提升安全性和经济性的同时，更好地实现了二者的平衡。华龙一号后续机型核岛厂房三维示意图如图 5 所示。华龙一号后续机型继承了华龙一号的核心技术特征，并引入了多项改进，如使用控制棒代替硼酸进行负载跟随，延长反应堆压力容器设计寿命至 80 年，并通过优化堆芯位置和增加轴流预热器来提升性能。在安全性方面，华龙一号后续机型通过优化能动与非能动安全设计，减少了对安全级设备的依赖，提升了非能动系统的作用，增强了纵深防御层次。

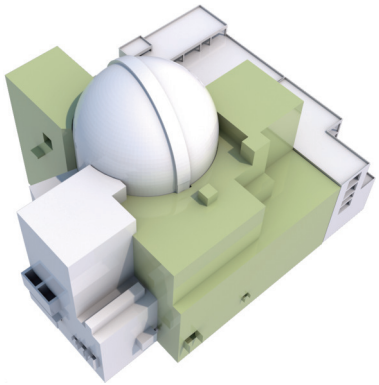


图 5 华龙一号后续机型核岛厂房三维示意图
Fig. 5 3D diagram of nuclear island building for follow-on model of HPR1000

华龙一号后续机型在模块化设计和施工技术上的创新，以 48 个月工期为目标，全面采用数字化建造技术，建立了工期、经济性和可建造性的评价标准，大量应用了先进施工技术，如工厂化预制、模块化施工、自动化流水线加工与焊接、先进无损检测技术等，并应用虚拟施工与智慧工地管理技术，可进一步提高施工质量与灵活性。

智能化技术的应用是华龙一号后续机型的技术创新重点，华龙一号后续机型以“少人监控、少人值守”的智能运行为目标，初步构建了智能化技术应用体系，具备支持电厂全寿期智能运维和管理的状态感知与数据空间，自动化、智能化的运行监测与控制，数字、数据驱动的智能运维管理与决策支持的技术特征。

2 压水堆核电面临的挑战与技术发展展望

2.1 压水堆核电面临的挑战

在新能源发电成本不断降低、先进储能技术不断发展、全球核电市场竞争日趋激烈的背景下，核电技术的发展仍然面临诸多问题与挑战。长远来看，压水堆技术生命力的延续乃至核能技术未来的长久发展取决于两方面技术挑战：一方面是突破制约安全性进一步提升的技术瓶颈，以满足未来不断提高的安全要求；另一方面是在延长核电设计运行寿期的同时，大幅降低建造与运维成本，以满足未来电力市场对经济性的要求。华龙一号的持续优化改进对可持续发展具有极其重要的现实意义。

压水堆属于热中子堆，由于采用高温高压轻水作为冷却剂和慢化剂等设计特点决定了通过提升固有安全特性来提升安全性存在较大困难[1]，为保障核电厂的安全运行，核电厂的设计采用纵深防御为基本原则，设置多层次的保护措施，其目的是确保控制反应性、排出堆芯衰变热和包容放射性物质这 3 项基本安全功能，以保障环境和公众的健康与安全[13]。围绕 3 项基本安全功能，压水堆设计了一系列安全系统和措施，如反应堆应急停堆系统、安注系统和安全壳系统等，为提升安全系统的可靠性，遵循单一故障原则，采用了冗余和多样化的设计，还需保证为安全系统提供电力、通风与冷却等的支持系统的独立性。持续提升安全性是核电发展的重要目标，随着安全设计理念不断完善及技术的进步，压水堆核电机组的安全水平得到不断提高，第 3 代压水堆的堆芯损坏频率和大量放射性释放频率较二代机组均降低了 1 个数量级以上[1]。但是，随着对事故现象的认

知与事故机理的研究更加深入、安全设计要求进一步强化,在提升安全性的同时,使压水堆的系统配置越来越复杂,核电经济性受到很大影响。进一步提升核电厂的安全性与提升经济性这一对看似矛盾的技术目标,成为压水堆核电技术难以突破的关键技术瓶颈。

借鉴压水堆技术发展逐渐走向成熟的历程,在新一代反应堆(如典型的第4代反应堆等)从研发到实现大规模商业化部署的工业化进程完成之前,压水堆预计仍有至少20年的发展空间。此外,考虑到核电发达国家早期建设运行的压水堆核电机组(设计寿期40年)已延寿至80年,我国已运行的二代改进型和正在批量化建设的第3代压水堆核电机组(设计寿期60年)完全有可能运行至21世纪末。在如此漫长的建造与运行过程中,压水堆核电技术的持续发展将是必然。进入21世纪以来,新一轮的能源革命蓬勃发展,以风电、太阳能为代表的可再生能源发电技术发展迅速,已经实现大规模商业化部署,随着储能、多能互补与智慧电网等新能源调控技术的应用,可更加灵活安全可靠地提供电力以满足不同负荷需求,并随着规模化发展,可快速降低建造与运维成本,不断提升其市场竞争力。新能源技术的发展无疑将压缩压水堆核电技术未来的生存空间,甚至给压水堆核电带来生存挑战。因此,突破制约压水堆核电发展的技术瓶颈,持续提升安全性与经济性仍是行业内亟待解决的问题,也是发展环境与发展形势的必然要求。

2.2　新材料技术的应用展望

核电是装备密集型产业,构成核能发电系统的材料性能对核电的安全性与经济性的影响至关重要,材料性能的退化和失效是导致设备与系统故障,造成核事故发生的主要原因。为进一步提升压水堆核电的安全性,提高构成安全相关设备与系统的材料性能,是后续技术发展应聚焦的重点方向。

核燃料熔毁是压水堆核电厂最为严重的事故现象,围绕反应性控制、余热排出和放射性包容3项基本安全功能,现有压水堆核电厂在设计上遵循纵深防御原则,均设置了多重应对和缓解严重事故的技术措施。而提高核燃料的材料性能,使之能够耐受更高温度,具有更好的放射性包容能力,无疑能更有效地预防严重事故,即以提升核燃料的“容错能力”来提升压水堆核电厂的“固有安全性”。基于新材料研发技术基础,行业内已聚焦研发新型的耐事故燃料(或称为容错燃料,ATF),包括增加新型涂层、新型燃料包壳和芯块材料的研究。经过近十年研发,已取得阶段性进展。近期,带有涂层的改进型燃料组件有望最早投入实际应用。

与此同时,其他新型材料技术与先进制造技术,如高温合金、碳纤维、增材制造等,也为提升核安全相关设备与系统性能与可靠性带来可能。

2.3　人工智能技术在核电领域的应用展望

近年来,人工智能技术飞速发展,在我国,压水堆核电装机容量在核能发电中占比超过95%,已累计了较长的运行堆年,积累了丰富的运行经验和数据,自主核电技术华龙一号的成功示范和后续的批量化建设、核电的数字化转型全面推进,都为人工智能技术在核电领域的应用创造了基础条件和技术快速迭代发展的应用环境。

人工智能技术的迅猛发展不仅在传统领域内推动了前所未有的技术革新,也孕育了许多跨时代的应用,这些应用正在重塑人类的工作和生活方式。在核电运维领域,人工智能技术的潜力同样引人注目,其应用可能彻底改变核电厂的运行和管理方式。基于以上认识,近年来核电行业已投入力量,如智能化设备健康管理、智能化运维辅助决策、智能巡检等,智能化技术在核电运维领域呈现出良好的发展势头。

安全是核电发展的生命线,以智能化技术提升核电运行安全水平,避免核事故的发生是智慧核电的发展方向。然而,核电本身具有极高的安全稳定运行特征,故障与事故数据在正常运行过程中无法获取,需要针对核电的“小样本”和高可靠性要求,开展如实施精确感知设备、系统与电厂状态的检测技术,高可靠性的事故预测与故障诊断等技术研究;利用智能化技术将传统安全设计中,假设事故发生后采取应对措施的“被动安全”,改变为提前预测预防事故发生的“主动安全”;同时随着自动化、智能化运行水平的提升,可有效避免因人员操作错误导致的事故,显著提升压水堆核电的安全性。为高效推进智慧核电建设,工作中必须坚持“需求牵引,目标导向,统筹规

划，统一标准，迭代发展”的原则，不断探索满足核电安全运行要求的智能化技术，逐渐建立技术验证方法与标准体系，并在应用实践中不断迭代发展，逐渐成熟起来，实现智能技术的高可靠性。

3 总结

华龙一号作为我国自主研发的第3代核电技术，充分吸取了历次核事故经验反馈，能够满足我国与国际上对先进核电的安全要求。首堆示范工程成功建成后，已连续安全稳定运行3个燃料循环，未发生非计划性停堆。首台机组福清核电5号机组在WANO评估中获得满分，证明了华龙一号自主先进核电技术是成熟可靠的。在首堆建成后，结合最新研究成果和运行与建造经验反馈，对华龙一号进行了持续的优化改进，使其安全性、经济性与先进性均得到进一步提升。目前，华龙一号已进入了批量化建造的规模化发展新阶段。压水堆核电未来发展仍面临严峻挑战，必须通过技术创新，突破制约压水堆发展的技术瓶颈；新型材料技术与人工智能技术的发展，为压水堆进一步提升安全性与经济性提供了极大可能；全行业应加快相关领域创新实践，持续提升压水堆核电的市场竞争力。让压水堆技术能够更好地支撑核能“三步走”战略，为实现“双碳”目标做出更大贡献。

参考文献：

[1] 邢继, 王辉, 吴宇翔, 等. 压水堆技术后续发展的思考[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(12): 1707-1713.
XING Ji, WANG Hui, WU Yuxiang, et al. Consideration on follow-up development of pressurized water reactor technology[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(12): 1707-1713(in Chinese).

[2] 张禄庆. 压水堆技术发展趋势概述[J]. 中国核电, 2008, 1(1): 40-43.
ZHANG Luqing. The development trend of PWR technology[J]. China Nuclear Power, 2008, 1(1): 40-43(in Chinese).

[3] International Atomic Energy Agency. Power reactor information system (PRIS)[EB/OL]. https://www.iaea.org/PRIS/home.aspx.

[4] UK Government. Civil nuclear roadmap to 2050 [EB/OL]. https://www.gov.uk/governmentt/publications/civil-nuclear-roadmap-to-2050/civil-nuclear-roadmap-to-2050-accessible-webpage.

[5] 邢继, 李崇, 吴宇翔, 等. “华龙一号” (HPR1000): 中国新名片[J]. 中国核电, 2017, 10(4): 457-462.
XING Ji, LI Chong, WU Yuxiang, et al. HPR1000, new brand of China[J]. China Nuclear Power, 2017, 10(4): 457-462(in Chinese).

[6] 中国核能行业协会. 全国核电运行情况 (2024年1—3月)[EB/OL]. http://www.china-nea.cn/site/content/44813.html.

[7] DOE. DOE announces $27 million for advanced nuclear reactor systems operational technology[EB/OL]. https://www.energy.gov/articles/doe-announces-27-million-advanced-nuclear-reactor-systems-operational-technology.

[8] Intel. Électricité de France: HPC modeling and simulation[EB/OL]. https://www.intel.com/content/www/us/en/customer-spotlight/stories/electricite-france-customer-story.html.

[9] GE Hitachi Nuclear Energy. BWRX-300 small modular reactor safety strategy[R/OL]. US: Nuclear Regulatory Commission. https://www.nrc.gov/docs/ML2234.

[10] 邢继, 吴宇翔, 刘倩雯, 等. 整体平衡的核安全观和能动与非能动先进核电厂[J]. 核科学与工程, 2023, 43(1): 141-150.
XING Ji, WU Yuxiang, LIU Qianwen, et al. Overall and balanced nuclear safety concept and active and passive advanced nuclear power plant[J]. Nuclear Science and Engineering, 2023, 43(1): 141-150(in Chinese).

[11] 人民日报. 全球首台“华龙一号”WANO综合指数达到满分[N/OL]. https://www.peopleapp.com/column/30044214908-500005280216/2024-04-03.

[12] 向世文, 杨俭泗, 毕晶, 等. 核电研发生命线: 安全, 经济——以提升项目效益为核心的批量化“华龙一号”模块化工艺研发管理与应用[J]. 中国质量, 2021(9): 113-117.

[13] 国家核安全局. HAF 102—2016 核动力厂设计安全规定[S]. 北京: [出版者不详], 2016.