

引用格式:周涛,张豪磊,姚焱,等.信息技术与先进核电发展趋势[J].南方能源建设,xxxx,x(1):1-6. ZHOU T, ZHANG H L, YAO Y, et al. Development trend of information technology and advanced nuclear power generation [J]. Southern energy construction, xxxx, x(1): 1-6. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-297.

信息技术与先进核电发展趋势

周涛^{1,2,3,✉}, 张豪磊^{1,2,3}, 姚焱^{1,2,3}, 刘春梅^{1,2,3}

(1. 东南大学能源与环境学院核科学与技术系, 江苏南京 211189;

2. 核热工安全与标准化研究所, 江苏南京 211189;

3. 大型发电装备安全运行与智能测控国家工程研究中心, 江苏南京 211189)

摘要: [目的]信息技术的发展引领着新时代的发展潮流。信息技术推进核电技术向智能化乃至智慧化发展,同时也保障着核电安全发展。[方法]给出了信息、核电、核电智能化的关联定位,研究了信息技术在未来核电中的应用,分析了先进核电的发展趋势。[结果]未来的核电首先应该是信息核电,其次是智能化核电,然后才有可能智慧化核电。5G 低时延的特点可以提高核电系统的精度,及时准确地调整核系统运行;云计算可以在核电大量复杂的数据中找到问题;大数据能及时解析问题的根源;量子技术能增强堆芯燃料功能;人工智能的机器数据抓取和神经网络学习更精确地处理和应用信息。[结论]信息化是一种新质生产力革命,信息技术推进核电技术向智能化发展,核电的智能化是未来先进核电发展趋势;信息技术升级是核电领先的推手;保障核电安全,需要信息的帮助;网络信息技术是核风光综合能源系统建设的中枢环节。

关键词: 信息技术; 先进核电; 发展趋势; 智能化; 智慧化; 数智化

中图分类号: TL48

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2025)

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-297

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Development Trend of Information Technology and Advanced Nuclear Power Generation

ZHOU Tao^{1,2,3,✉}, ZHANG Haolei^{1,2,3}, YAO Yao^{1,2,3}, LIU Chunmei^{1,2,3}

(1. Department of Nuclear Science and Technology, School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;

2. Institute of Nuclear Thermal-hydraulic Safety and Standardization, Nanjing 211189, Jiangsu, China;

3. National Engineering Research Center of Power Generation Control and Safety, Nanjing 211189, Jiangsu, China)

Abstract: [Introduction] The development of information technology leads the development trend of the new era. Information technology promotes the progress of nuclear power generation technology to intelligentization and even smartization, while also ensuring the safe development of nuclear power generation. [Method] The positioning association of information, nuclear power generation, and the intelligentization of nuclear power generation was provided. The application of information technology in future nuclear power generation was studied. The development trend of advanced nuclear power generation was analyzed. [Result] The future nuclear power generation should first be information-based nuclear power generation, followed by intelligent nuclear power generation, and then possibly smart nuclear power generation. The characteristics of 5G low delay can make the nuclear power generation system more accurate, and the nuclear system can be accurately adjusted to operate faster and respond in time. Cloud computing can also find problems in nuclear power generation's complex mass of data. Big data can analyze the root causes of problems in a timely manner.

收稿日期: 2024-09-06 修回日期: 2024-11-07

基金项目: 科技部重点研发计划“固有安全模块化金属弥散热管反应堆设计技术”(2020YFB1901700); 江苏省双创人才经费“多介质颗粒物流动换热特性研究”(110300297); 中核科技工业核动力技术创新中心项目“基于相场-流场耦合的相分离组织演变模拟技术”(6903003092)

Quantum technology can enhance the core fuel function. Artificial intelligence machine data capture and neural networks learn to process and apply information more precisely. [Conclusion] Informationization is also a new quality productivity revolution, and information technology promotes the progress of nuclear power generation technology to intelligent development. The intelligence of nuclear power generation is the future trend of advanced nuclear power generation development. The upgrading of information technology is the leading driver of nuclear power generation. Ensuring nuclear power generation safety requires the assistance of information. Network information technology is the central link to build a comprehensive nuclear and solar energy system.

Key words: information technology; advanced nuclear power generation; development trend; intelligentization; smartization; digital intelligence

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

解决能源问题是推进中国式现代化的一件大事。核能发电作为电力系统中十分重要的组成部分,深受国家重视。党的十九届五中全会确立了将碳达峰、碳中和作为“十四五”时期和 2035 年生态文明建设的目标。毫无疑问,核能这一清洁能源会在碳达峰、碳中和目标实现进程中起到重要作用^[1-2]。党的二十大报告提出“深入推进能源革命”“积极安全有序发展核电”。2023 年 9 月,习近平总书记首次提出新质生产力。2024 年 1 月中央政治局集体学习时,习近平总书记对其作出了系统全面阐释,这一原创性概念成为国内外高度关注的中国推进高质量发展的重要着力点。2024 年 3 月 5 日,国务院总理李强在十四届全国人大二次会议中指出,我国的关键核心技术攻关成果丰硕,航空发动机、燃气轮机、第四代核电机组等高端装备研制取得长足进展。核电^[3]已经成为我国实施“双碳”战略、优化能源结构、推动绿色发展的重要选择。新时代核能^[4]将扮演重要角色,其中模块化小型核反应堆将成为新兴力量助力核能多元化发展。核电的发展从未停止脚步,它在新时代也具有了一个新的技术特征——信息化。信息技术^[5-6]的发展正引领着新时代的发展潮流。毫不夸张地说,掌握了未来的信息,就掌握了未来的发展。而信息技术则是掌握先进信息的基本载体。所以,信息技术深刻影响着各个领域的发展。核电是未来具有发展前景的新能源,核电技术是正在发展的先进能源技术。先进核能^[7]的发展,也离不开信息技术。所以,利用信息技术,促进核电发展,是先进核电发展和领先的题中之义。同时,先进核电的发展也会支撑信息技术不断发展。

1 基本概念

1.1 信息技术

信息技术,是主要用于管理和处理信息所采用的各种技术的总称,主要包括:各类网络;云计算^[8],大数据^[9]等智能技术。它主要是应用计算机科学和通信技术来设计、开发、安装和实施信息系统及应用软件。

1.2 核电技术

核电技术^[10]是利用核裂变或核聚变反应释放的能量来发电的技术。因为受控核聚变存在技术障碍,核电站都是采用核裂变技术。截至 2024 年 1 月,世界上共有核电站 413 座,其中绝大多数为建成于 20 世纪的第二代或二代加反应堆,其中压水堆是主体。近几年,中国率先建成了第三代压水堆^[11]。

1.3 智能化

智能化^[12-13]是指事物在计算机网络、大数据、物联网^[14]和人工智能^[15]等技术的支持下,所具有的能满足人的各种需求的属性。相对于传统媒体,智能化是建立在数据化基础上的媒体功能的全面升级。智能化是未来核电发展的趋势。

1.4 智慧化

智慧化(Smartization)作为一个复合词独立使用时指信息化、智能化建设的最新阶段,以深度学习^[16]、边缘计算^[17]等前沿技术的融入为特征。

2 作用定位

2.1 定位关联

信息、核电、核电智能化的定位关联如图 1 所示。从图 1 可以看出,信息是核电发展的依据,核电是信息应用的对象,智能化是实现信息核电的方式。

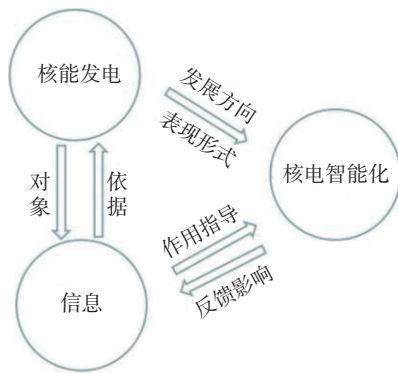


图 1 信息、核电、核电智能化的定位关联

Fig. 1 Positioning association of information, nuclear power generation, and the intelligentization of nuclear power generation

信息可以促进核电和核电智能化的发展,核电是信息的落实与固化,智能化是信息核电的表现形式。信息技术推进核电技术进步向智能化发展,核电技术涵盖信息技术,核电智能化反馈影响信息的内容。先进的核电技术一定包含先进的信息技术,并且是智能化的。信息技术保障着核电安全发展,核电的安全发展也推动着信息技术的进步,二者相辅相成,协调统一,共同促进核电智能化发展。信息化是一种革命,核电的智能化是未来先进核电的发展趋势。

2.2 信息智慧定位

信息是财富,是进步的源泉。核电进步必须依靠包括信息技术在内的核电技术。所以,信息十分重要。目前全球核电种类繁多,技术也日新月异。目前建设成功的第三代核电已有多种类型,第四代核电系统国际论坛(Generation IV International Forum, GIF)组织推荐了 6 种堆型。有人提出信息化第五代核电的标志之一。核聚变的最新发展信息不断涌现。全球积极研究建设小型核反应堆,正在开发的小型核反应堆技术超过 80 种。如此多的核电信息如何选择应用,是一个重要问题。为解决这个问题,就可以充分利用大数据和云计算技术,挖掘重要有用信息。有信息才可能是智能的,也才有智慧的条件。有了创新的信息,找准切入点,找准方向,交叉应用,形成智慧新发展。要让信息发挥智慧作用,让智慧发挥信息的功效。

2.3 信息方向定位

世界上万事万物都是联系的。一些信息看似是非核电信息,却给核电带来革命性变化。一些不经意的事情,也许就是最新的发展,推进着核电技术进

步。所以,要关心一些非直接核电信息,将其作为储备。核电系统本身是一个大的系统。任何先进的技术,无论是新兴材料还是通信技术,都会在核电系统中找到用武之地。它们在核电系统中的应用也是核电发展的一个重要部分。面对海量信息,还要去伪存真,让正确的、有用的信息助力发展。信息是力量,信息也是方向,信息也是生产力。信息有正有负,所以,要正确选择信息,同时也要注意信息安全。

2.4 信息交叉定位

采用先进的信息技术实现运行、维修、培训等生产信息与管理信息的智慧结合,实现人、技术、经营目标和管理方法集成的智能乃至智慧核电厂,将会是核电管理思想的新突破。各类信息都会更多、更好地交叉和汇合,如核物理参数信息、热工参数信息、材料参数信息等。智能应用这些信息的交叉和互相影响关系,就能更加精准地掌控反应堆的运作。信息化是新时代的特征,掌握了信息技术就掌握了未来。所以,要积极应用信息技术发展核电,也只有应用信息技术才能发展核电。

2.5 信息创新定位

核电的发展靠技术,技术的先进代表着核电的先进。当然,这里的技术也包括信息技术。从 20 世纪 60 年代核电兴起,到 21 世纪第三代核电建成、第四代核电研发,都是在冷却剂、燃料及结构等方面改进,都是核电技术中物理热工技术的改进与发展,信息技术在核电系统中的应用只是一些仪控通讯系统中的基本应用,只是作为辅助。但在未来,随着 5G 技术^[18]甚至 6G 技术的发展,核电小型化的趋势,信息技术应该更加密切地融入核电,深入核电各个系统,无处不在。信息技术必定带来核电革新。信息的交流应该是现代先进核电的标志,是从“信函式核电”到“量子核电”的飞跃。未来的核电首先一定是现代信息核电。这是核电发展的新方向。大数据、云计算、5G、6G 等一切新兴信息技术都可以为核电发展服务。核电也将不断走向数字化和智能化,再由智能化走向智慧化。

2.6 信息安全定位

技术发展是进步,但是也存在风险。在促进核电发展的同时,信息技术的不当应用,会造成对核电的危害,甚至带来核安全问题。信息技术造成的核电安全风险包括网络攻击风险、系统可靠性风险、

人员操作风险和数据泄漏风险等。但是核电离不开信息技术,未来的核电是基于信息技术的核电。信息技术的进步会带来较大的核电风险,但也可以造就更加安全的核电。因此,一方面要利用信息技术及时发现问题;另一方面,要利用信息技术积极防范和主动出击,加强现代化防御。信息要安全,安全要信息。保障核电安全,需要信息的帮助。

3 范围场景

3.1 应用范围

信息技术在未来核电中的应用应该是广泛的。信息技术推动核电智能化主要表现在以下方面:智能化仪控系统的实现、数字化技术的应用、智能装备与机器人的应用、信息化系统的建设、网络安全与数据保护。在这些方面应用信息技术可以提高核电站的安全性和运行效率,降低运行和维护成本。同时,还需要加强网络安全和数据保护工作,确保核电站的智能化进程顺利;需要在人力、技术、管理及投入上不断加强,强化信息关联的软硬设施。

3.2 虚拟现实反应堆

虚拟堆通常指的是在计算机技术中,通过模拟和仿真技术构建的虚拟反应堆模型^[19]。信息技术在虚拟堆中的具体应用包括建模与仿真技术、数据处理与分析技术、远程监控与诊断技术、虚拟现实^[20]与增强现实技术^[21]等。其中,通过虚拟现实技术,可以构建出与真实反应堆相似的虚拟环境,使操作人员能够在虚拟环境中进行培训和操作练习。增强现实技术则可以将虚拟信息叠加到真实环境中,为操作人员提供更直观、丰富的信息支持。

3.3 具体案例

1) 芬兰 OL3 核电站项目的教训

芬兰奥克基洛托 3(OL3)核电站项目^[22]在建设过程中遭遇了管理、技术、安全、监管等多方面的问题,导致竣工时间大幅延误,投资额飙升。该项目的失败在很大程度上归咎于信息传递不畅和工作协同问题,凸显了信息技术在核电项目管理中的重要性。如果能够利用先进的信息技术建立有效的协同工作平台、进度管理系统和文档管理系统,或许可以避免这类问题的发生,从而提高项目的成功率。

2) 某核电集团开展的数字化转型

某核电集团以 ERP(Enterprise Resource Planning,

企业资源规划)为核心构建了信息化应用架构,并逐步积累了大量有价值的数据库资源。通过深入探索数据可视化管理与应用开发,该集团能够更有效地管理业务流程、优化资源配置,并提升整体运营效率。这一案例表明,信息技术在核电领域的广泛应用可以推动核电企业的数字化转型,从而提升其核心竞争力。

3) 中国核电的现有信息化建设

我国一些规模较大的核电站信息化建设集中在运行管理、生产管理、ERP 等方面。例如,2024 年各核电单位召开信息化工作会议强调推进数智化工作;中国核电 2017 年召开了年度信息化会议,在会议中确立了核电信息化工程,对核电厂生产管理平台、人财物经营管理一体化平台、企业内容管理一体化平台和设备可靠性管理一体化平台的系统建设成果进行了展示;秦山核电厂采用了 OLMS 系统进行信息化的管理和建设,带动了行业信息化的发展;岭澳核电站则应用 IP 多媒体子系统技术,采用移交管理的方式,全面改善了核电站的管理水平,提升了核电站运行效率的同时,有效控制了投入成本。

4 发展趋势

4.1 信息技术是核电领先的推手

从 3G 到 4G,再到 5G,甚至是 6G,信息技术一直在更新迭代,将不断更新的信息技术用于核电,核电技术也在不断地革新发展。所以,信息技术是核电领先的推手。5G 技术推动核电站实现数字化、智能化,5G 低时延的特点可以让核电系统精度更高,从而准确调整核系统运转使其及时响应;云计算也可以在核电复杂大量数据中找到问题;大数据则能及时解问题的根源;量子技术^[23]则能增强堆芯燃料功能;人工智能的机器数据抓取和神经网络学习更精确地处理和应用信息。信息技术能更快找到相关问题的对策,保障核电安全。推动核电技术发展首先一定要掌握信息技术的最新发展情况,及时应用现有信息技术对核电系统进行改进,发展新一代核电。

4.2 信息技术是先进核电的基本特征

刚刚开始建设的第三代核电是新时代的先进核电,采用了一些先进的信息技术,但还不是未来的先进信息核电。正在研究的第四代核电结构已基本定型,虽然可以更多更好地采用信息技术,但因为原来

早已经确定的基本定构,也不大可能是先进的信息核电。关于五代核电,有人提出其应该具备信息化特征,但还没有公论。一些人认为第五代核电是核电技术的又一新阶段,另一些人认为是应用了 5G 技术的网络化的核电。但概括起来,可以肯定的一点是必须应用最新信息技术,必须是信息核电。所以,先进的信息核电是一个需要发展的新概念。信息化一定是先进核电的最本质特征,这个变化一定是革命性的,要靠新质生产力的推进。单靠核电结构技术的改进不能算本质上的先进信息核电。先进的信息核电一定具备标准统一、数据质量严格,高效率精准智慧沟通的基本特征。

4.3 信息技术是核风光综合能源系统的运行中枢

核风光综合能源系统是未来发展的能源系统,适用面广,前景可期。针对资源不确定性,核风光综合能源系统可以有不同的结构,以适应人类的需求。随着时代的发展,低碳排放成为综合能源系统的要求。核风光系统则是一种可以适应边远地区、海岛和医院的一种分布式能源系统。如何正确形成网络,并且使其协调运转,就需要应用信息技术来沟通。这就是一种智能乃至智慧的系统,先进的网络信息技术为此系统的实现提供了可能。信息技术可以保障系统充分利用各能源特点,发挥各自长处,得到功能最优解。

5 结论

1) 信息技术是核电领先的推手。5G、大数据、量子技术、人工智能等技术应用促进核电技术的发展。信息技术的更新迭代推动核电技术发展革新。

2) 未来的核电应该首先是信息核电,必须应用新质生产力推进的信息技术。信息核电是现代核电的最本质特征。要明确信息智慧、方向、交叉、创新、安全在核电中的五大定位。

3) 信息技术推进核电技术进步向智能化发展,信息技术保障着核电安全发展,核电的安全发展也推动着信息技术的进步,二者相辅相成。

4) 网络信息技术是核风光综合能源系统运行的中枢环节。

参考文献:

[1] 王鑫,吴继承,朴磊. “双碳”目标下核能发展形势思考 [J]. *核科学与工程*, 2022, 42(2): 241-245. DOI: 10.3969/j.issn.0258-

0918.2022.02.001.

WANG X, WU J C, PU L. Consideration of the development situation of nuclear power under the goal of carbon peaking and carbon neutrality [J]. *Nuclear science and engineering*, 2022, 42(2): 241-245. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2022.02.001.

[2] 蔡绍宽. 双碳目标的挑战与电力结构调整趋势展望 [J]. *南方能源建设*, 2021, 8(3): 8-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.002.

CAI S K. Challenges and prospects for the trends of power structure adjustment under the goal of carbon peak and neutrality [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(3): 8-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.002.

[3] 中核战略规划研究总院,中国核能行业协会,中智科学技术评价研究中心. 中国核能发展报告(2024) [R]. 北京:中国核能行业协会,2024.

China Institute of Nuclear Industry Strategy, China Nuclear Energy Association, China Institute of Science and Technology Evaluation. The Report on the development of China's nuclear energy (2024) [R]. Beijing: China Nuclear Energy Association, 2024.

[4] 顾有为. “一带一路”核电出口国际竞争力分析 [J]. *能源*, 2020(1): 58-61.

GU Y W. Analysis on international competitiveness of nuclear power export under the Belt and Road Initiative [J]. *Energy*, 2020(1): 58-61.

[5] XU K W, LIU Z Y, SUN W C. Optimal operation of park-level integrated energy system based on multi-agent cooperative game [J]. *Frontiers in energy research*, 2022, 10: 970344. DOI: 10.3389/fenrg.2022.970344.

[6] LI Y, BU F J, LI Y Z, et al. Optimal scheduling of island integrated energy systems considering multi-uncertainties and hydrothermal simultaneous transmission: a deep reinforcement learning approach [J]. *Applied energy*, 2023, 333: 120540. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.120540.

[7] HOU G L, JIAN X H. Distributionally robust chance-constrained economic dispatch of multi-area electricity-gas-heat integrated energy systems [J]. *Electric power systems research*, 2023, 217: 109090. DOI: 10.1016/j.epr.2022.109090.

[8] 张宝元. 云计算技术发展分析及其应用探讨 [J]. *通信电源技术*, 2021, 38(10): 183-185. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2021.10.057.

ZHANG B Y. Cloud computing technology development analysis and application discussion [J]. *Telecom power technology*, 2021, 38(10): 183-185. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2021.10.057.

[9] 刘智慧,张泉灵. 大数据技术研究综述 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2014, 48(6): 957-972. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2014.06.001.

LIU Z H, ZHANG Q L. Research overview of big data technology [J]. *Journal of Zhejiang university (engineering science)*, 2014, 48(6): 957-972. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2014.06.001.

- [10] 周涛. 非能动概念与技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
ZHOU T. Passive concepts and technologies [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.
- [11] 中华人民共和国科学技术部. 我国大型先进压水堆核电自主化取得新跨越 [EB/OL]. (2011-02-02) [2024-11-07]. https://most.gov.cn/kjbgz/201102/t20110211_84698.html.
Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. China's large-scale advanced pressurized water reactor nuclear power independence has made a new leap [EB/OL]. (2011-02-02) [2024-11-07]. https://most.gov.cn/kjbgz/201102/t20110211_84698.html.
- [12] 李鸣谦, 王硕, 陈日昱. 核电厂智能化仪控系统应用框架设计及实现构想 [J]. 产业与科技论坛, 2022, 21(22): 42-44. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5641.2022.22.016.
LI M Q, WANG S, CHEN R G. Application framework design and realization of intelligent instrument control system for nuclear power plant [J]. Industrial & science tribune, 2022, 21(22): 42-44. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5641.2022.22.016.
- [13] 陈银萍, 孙朋朋. 智慧核电厂信息系统设计 [J]. 电脑知识与技术, 2022, 18(12): 78-80. DOI: 10.14004/j.cnki.ckt.2022.0645.
CHEN Y P, SUN P P. Wisdom nuclear power plant information system design [J]. Computer knowledge and technology, 2022, 18(12): 78-80. DOI: 10.14004/j.cnki.ckt.2022.0645.
- [14] 梅豪杰, 樊佩佩. 物联网技术浅析 [J]. 漯河职业技术学院学报, 2012, 11(2): 78-79. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7864.2012.02.032.
MEI H J, FAN P P. Analysis of internet of things technology [J]. Journal of Luohe vocational technology college, 2012, 11(2): 78-79. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7864.2012.02.032.
- [15] 刘舒巍, 杨和辰, 余夏, 等. AI 技术在电力系统发展中的应用与前景 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(5): 149-158. DOI: 10.16516/j.ceeec.2024.5.16.
LIU S W, YANG H C, YU X, et al. Application and prospect of AI technology in power system development [J]. Southern energy construction, 2024, 11(5): 149-158. DOI: 10.16516/j.ceeec.2024.5.16.
- [16] 尹宝才, 王文通, 王立春. 深度学习研究综述 [J]. 北京工业大学学报, 2015(1): 48-59. DOI: 10.11936/bjtxb2014100026.
YIN B C, WANG W T, WANG L C. Review of deep learning [J]. Journal of Beijing university of technology, 2015(1): 48-59. DOI: 10.11936/bjtxb2014100026.
- [17] 赵梓铭, 刘芳, 蔡志平, 等. 边缘计算: 平台、应用与挑战 [J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(2): 327-337. DOI: 10.7544/issn1000-1239.2018.20170228.
ZHAO Z M, LIU F, CAI Z P, et al. Edge computing: platforms, applications and challenges [J]. Journal of computer research and development, 2018, 55(2): 327-337. DOI: 10.7544/issn1000-1239.2018.20170228.
- [18] 尤肖虎, 潘志文, 高西奇, 等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术 [J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(5): 551-563 DOI: 10.1360/N112014-00032.
YOU X H, PAN Z W, GAO X Q, et al. The 5G mobile communication: the development trends and its emerging key techniques [J]. Scientia Sinica Informationis, 2014, 44(5): 551-563. DOI: 10.1360/N112014-00032.
- [19] 才春梅. 虚拟反应堆——数字反应堆 [J]. 中国核电, 2018, 11(2): 244.
CAI C M. Virtual reactor: digital reactor [J]. China nuclear power, 2018, 11(2): 244.
- [20] 张量, 金益, 刘媛霞, 等. 虚拟现实 (VR) 技术与发展研究综述 [J]. 信息与电脑 (理论版), 2019, 31(17): 126-128.
ZHANG L, JIN Y, LIU Y X, et al. Review of virtual reality (VR) technology and development [J]. China computer & communication, 2019, 31(17): 126-128.
- [21] 吴睿华. 增强现实 (AR) 技术应用与发展趋势 [J]. 通讯世界, 2019, 26(1): 289-290. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4222.2019.01.186.
WU Q H. Application and development trend of augmented reality (AR) technology [J]. Telecom world, 2019, 26(1): 289-290. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4222.2019.01.186.
- [22] 刘曦. 欧洲最大核电机组投入日常运营 [EB/OL]. (2023-04-16) [2024-11-07]. http://www.news.cn/world/2023-04/16/c_1212095215.htm.
LIU X. Europe's largest nuclear reactor enters service [EB/OL]. (2023-04-16) [2024-11-07]. http://www.news.cn/world/2023-04/16/c_1212095215.htm.
- [23] 徐启建, 金鑫, 徐晓帆. 量子通信技术发展现状及应用前景分析 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(5): 491-497. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5692.2009.05.010.
XU Q J, JIN X, XU X F. An analysis of state-of-the-art and foreground of quantum communication technology [J]. Journal of China academy of electronics and information technology, 2009, 4(5): 491-497. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5692.2009.05.010.

作者简介:



周涛

周涛(第一作者, 通信作者)

1965-, 男, 教授, 东南大学能源与环境学院核科学与技术系主任, 博导, 博士, 主要研究方向为核热工水力与安全(e-mail)101012636@seu.edu.cn。

张豪磊

2000-, 男, 博士, 主要研究方向为核热工水力与安全(e-mail)zhangkk2022@126.com。

姚垚

1995-, 女, 博士, 主要研究方向为核热工水力与安全(e-mail)yao228117@163.com。

刘春梅

1989-, 女, 博士后(e-mail)101300161@seu.edu.cn。

(编辑 叶筠英)