

数字孪生在先进核能领域中的 关键技术与应用前瞻

胡梦岩¹, 孔繁丽^{2,3}, 余大利², 杨军¹

- (1. 华中科技大学 能源与动力工程学院, 湖北省 武汉市 430074;
2. 中国科学院 合肥物质科学研究院, 安徽省 合肥市 230031;
3. 中国科学技术大学 研究生院科学岛分院, 安徽省 合肥市 230026)

Key Technology and Prospects of Digital Twin in Field of Advanced Nuclear Energy

HU Mengyan¹, KONG Fanli^{2,3}, YU Dali², YANG Jun¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China; 2. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui Province, China; 3. Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui Province, China)

ABSTRACT: Digital twin is a technology to realize the mapping of a physical system to a digital model of the information space. It is listed as one of the six cutting edge technologies in the future national defense and aerospace industry. It is also expected to play an important role in the advanced nuclear energy systems such as the intelligent control of a nuclear power plant, the space reactor, the small module reactor, etc. In recent years, some countries have launched projects to develop digital twin technology for the nuclear reactors, with the goal of reducing their operation and maintenance costs of the nuclear power plants significantly. The research and development of digital twin systems for space nuclear power and lunar-based nuclear power devices has also received attention. This article comprehensively describes the research status and development directions of the digital twin technology in the field of the advanced nuclear energy. It proposes a multi-dimensional evaluation digital model suitable for nuclear reactors, initially builds an error diagnosis process, and discusses the key technology and the potential application of digital twin in the field of the advanced nuclear energy.

KEY WORDS: digital twin; GEMINA project; digital reactor; error diagnosis

摘要: 数字孪生(digital twin, DT)是一种实现物理系统向信息空间数字化模型映射的技术,被列为未来国防和航天工业6大顶尖技术之一,也被认为将在核电厂智能控制、空间反

应堆、小型模块堆等先进核能系统中发挥重要作用。近年来,部分国家已启动项目,开发应用于反应堆的数字孪生技术,目标是显著降低未来核电厂的运行和维修成本。针对于空间核电源、月基核动力装置的数字孪生系统研发也受到关注。综合叙述了数字孪生技术在先进核能领域的研究现状与发展方向,提出了适用于核反应堆领域的多维评估数字模型,初步建立了故障诊断流程,并对数字孪生在先进核能领域中的关键技术与应用前景进行了分析和展望。

关键词: 数字孪生; GEMINA 项目; 数字反应堆; 故障诊断

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0335

0 引言

数字孪生(digital twin, DT)技术是一种实现物理系统向数字化模型映射的关键技术。它充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据,集成多学科、多物理场、多时间尺度的仿真过程,在虚拟空间中完成映射,从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程。工业产品在设计 and 生产阶段,会带有一定的不可知或不确定性,数字孪生技术的出现,可以充分缓解这一设计制造的难题^[1]。借助于各种高性能传感器和高速通信,数字孪生可以通过集成物理实体的多维数据,辅以数据分析和仿真模拟,近乎实时地呈现物理实体的实际情况,并通过虚实交互接口对物理实体进行反馈和控制^[2-4]。

工业上孪生的概念起源于美国阿波罗载人登月工程时代,需建造一个与实际飞船 1:1 的地面飞船模拟实际飞行经历的操作,以此来反映实际飞行

基金项目: 国防科技工业核动力技术创新中心项目(HDLCXZX-2020-ZH-025)。

Project Supported by National Defense Science, Technology and Industry Nuclear Power Technology Innovation Center (HDLCXZX-2020-ZH-025).

中的飞船的状态,并为飞船的监控和维护提供参考。数字孪生概念的提出可以追溯到2003年,美国密歇根大学(university of michigan, UM)的Grieves教授在向工业界展示如何进行产品生命周期管理时提出的2个系统,即真实系统和虚拟系统^[1-5]。数字孪生作为一种融合数据、模型、人工智能(artificial intelligence, AI)等多学科于一体的技术,在产品全生命周期的设计过程中,发挥着连接物理世界与虚拟世界的桥梁纽带作用^[6]。物理空间、虚拟空间以及两者间交互数据流被认为是数字孪生的3个基本要素^[7],如图1所示,实体装置和虚拟空间中的数字虚拟装置形成孪生。虚拟空间接收从物理空间传来的数据,镜像真实系统的状态,物理空间也可以接收虚拟空间传来的指导信息,做出响应。

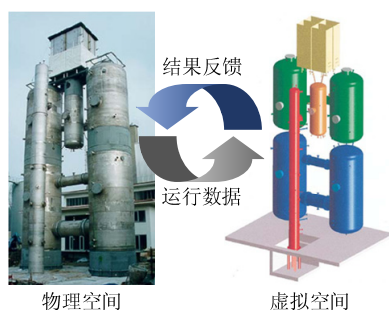


图1 数字孪生的基本概念模型

Fig. 1 Basic conceptual model of digital twin

1 数字孪生技术研究现状

随着美国“工业互联网”、德国“工业4.0”及“中国制造2025”等国家战略的提出,智能制造已成为全球制造业发展的共同趋势与目标。数字孪生作为解决智能制造信息物理融合问题和践行智能制造理念的关键技术,得到了学术界的广泛关注和研究,并被工业界引入到越来越多的领域进行应用^[7]。研究表明,随着物联网传感器、高精度建模和其他技术的改进,数字孪生市场预计将从2019年的38亿美元增长到2025年的358亿美元。高德纳(Gartner)咨询公司连续三年将数字孪生列为十大技术趋势之一^[8];洛克希德马丁公司2017年将数字孪生列为未来国防和航天工业6大顶尖技术之一;2017年中国科协智能制造学术联合体在世界智能制造大会上将数字孪生列为世界智能制造十大科技进展之一。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)将物理系统与其等效的虚拟系统相结合,研究了基于数字孪生的复杂系统故障预测与消除方法,并应用于飞机、飞船、运载火箭等飞行器系统的健康管理中^[1]。

2020年11月,《数字孪生应用白皮书》^[9]发布,通过对数字孪生进行详细定义和案例分析,加快推动数字孪生发展应用。目前对于数字孪生的研究包括:各领域中的应用数字孪生技术时概念模型的建立,实现数字孪生所需的相关技术,如何使用数字孪生技术对物理实体进行镜像同步以及在虚拟空间对数字孪生模型进行仿真分析、故障诊断和寿命预测等,研究现状总结如表1所示。Scopus数据显示,截至2021年4月已有近4000篇以数字孪生为关键词的文献。相关文献从2018年开始迅速增加,其中北京航空航天大学是国内相关文献发表最多的研究机构。

2 数字孪生技术在先进核能领域中的应用

2018年麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)开展了一项由众多研究者参与的跨学科研究并发布了研究报告《The Future of Nuclear Energy in a Carbon Constrained World》^[10]。该报告提出了全新的核反应堆技术开发和部署范例,其中包括加大虚拟反应堆和数字化孪生技术的使用力度,建议采用集成的计算机模拟和建模,将开发过程缩短10~12年。西门子发布《The virtual nuclear reactor》白皮书,通过新型冷却剂等3个例子说明数字孪生技术应用于核反应堆时的价值和潜力^[11]。

美国能源部于2020年5月宣布,作为先进能源研究计划署智能核资产管理发电(Generating Electricity Managed by Intelligent Nuclear Assets, GEMINA)规划的一部分,将为9个项目提供2700万美元资助^[12]。这些项目致力开发数字孪生技术,目标是使下一代核电站的运行和维修(operations and maintenance, O&M)成本降低90%^[13]。GEMINA项目将集中于反应堆堆芯、核岛外的其他设施或整个核电厂的O&M方案。由于多数下一代先进堆仍在设计阶段,尚无实际运行的机组,所以还需开发虚拟物理系统,使用综合的非核实验设施和软件,模拟先进堆运行动态。参与GEMINA项目的机构包括X-能源公司(X-Energy)、北卡罗来纳州立大学(North Carolina State University, NCSU)、UM、阿贡国家实验室(Argonne National Laboratory, ANL)、爱达荷国家实验室(Idaho National Laboratory, INL)、凯洛斯能源公司(Kairos)、柯蒂斯莱特(Curtiss Wright)、通用电气公司(General Electric Company, GE)、艾斯能公司(Exelon)、橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)、田纳西大学诺

克斯维尔分校(University of Tennessee, Knoxville, UTK)、通用日立(GE-Hitachi)、MIT、美国电力研究院(Electric Power Research Institute, EPRI)、法马

通公司(Framatome)、摩尔特斯能源公司(Moltex)等, 具体研究内容详见表 2。

2020 年 9 月, 法国电力集团(Electricite De

表 1 国内外数字孪生技术的研究现状
Table 1 Research status of digital twin technology at home and abroad

类型	研究内容
DT 概念 模型	<p>基于核工程基础设施的真实生命周期理想化的 5 个阶段提出了具有 5 个相应阶段的并行数字世界或环境^[14]</p> <p>数字孪生车间的系统组成、运行机制、信息物理耦合的关键技术等^[15-16]</p> <p>产品数字孪生体的内涵、体系结构、实施途径及发展前景^[17]</p> <p>一种包含产品构型信息的产品数字孪生模型的构建框架和基于本体的表达方式^[18]</p> <p>概念模型和数字孪生模型的虚拟表示的区别^[16]</p> <p>数字孪生驱动的产品设计、虚拟样机等 14 类应用设想^[2]</p> <p>数字孪生五维模型^[7, 19]</p> <p>基于不同研发团队的数字孪生产品兼容性差、互操作困难等问题构建数字孪生标准体系^[20]</p> <p>生产车间三维可视化监控关系及实施方法^[21]</p> <p>核仪控 DCS(digital control system)数字孪生全生命周期框架、各阶段的建设任务及关键技术^[22]</p> <p>数字孪生卫星概念、组成、核心要素、关键技术体系等^[23]</p> <p>数字孪生技术应用于反应堆结构设计及优化、故障预测等方面的探讨及展望^[24]</p>
DT 技术	<p>数据融合方面的降维处理^[25]</p> <p>传感器数据与制造数据集成融合^[26]</p> <p>多模态数据采集方法及其要求和局限性^[27]</p> <p>西门子的 STAR-CCM+软件提高泵的设计水平^[28]</p> <p>通过调制传递函数、动态贝叶斯网络、粒子滤波算法等技术解决光电数字孪生系统性能预测问题^[29]</p> <p>采用统一建模语言和映射策略的多域建模方法^[30]</p> <p>实现数字孪生在建模时遇到的困难及可用技术^[31]</p> <p>人工智能、物联网和数字孪生的挑战、应用和实现技术^[32]</p>
DT 镜像 同步	<p>考虑数据交互的虚拟装配^[33]</p> <p>实时运行状态监测^[26]</p> <p>搭建虚拟仿真环境, 采用面向事件响应的数据管理方法构建了基于数据驱动的数字孪生车间系统, 实现对物理车间的实时镜像^[34]</p>
DT 仿真 分析	<p>基于数字孪生模型的飞机结构寿命预测和结构完整性保证的概念模型^[35]</p> <p>多目标、快速、个性化设计生产线及其优化; 提供工程分析能力和支持决策的系统设计和解决方案评估的基于数字孪生的分析解耦框架^[36]</p> <p>通过导波响应询问损伤的方法进行故障定位^[37]</p> <p>风力发电机组数字孪生模型的故障预测及健康管理^[19]</p> <p>即将退役的核废水管理设施的数字孪生样机模型^[38]</p> <p>借助 COMSOL 仿真软件对油浸式变压器建立数字孪生模型, 进行匝间短路问题的故障诊断研究^[39]</p> <p>基于数字孪生的光伏发电功率超短期预测机制, 根据 GA-BP(genetic algorithm - back propagation)神经网络进行光伏功率预测^[40]</p> <p>将 GRU(Gated Recurrent Unit)方法引入到数字孪生框架, 对混合储能服务系统的功率分配策略进行优化^[41]</p> <p>借助 Opal-RT 仿真平台对所提出的基于数字孪生驱动的智慧微电网多智能体控制架构进行验证, 并得出优化调度方法^[42]</p>

表 2 GEMINA 项目参与机构及研究方向
Table 2 GEMINA project participating institutions and research directions

机构		研究内容	金额/美元
领导机构	参与机构		
X-energy	NCSU	用于 Xe-100 电站数字孪生体的先进 O&M 技术	6000000
UM	ANL、INL、Kairos、Curtiss Wright	AI 增强型核反应堆“数字孪生体”, 以期提高对部件更换时间的预测, 降低反应堆建造成本, 改善核电的供应能力	5195000
ANL	Kairos	先进反应堆传感器和组件维护的研究, 目标为构建一个可扩展的数字孪生系统, 并配备数字工具, 实现先进反应堆发电厂维护、运行和监控的自动化	2200000
GE	Exelon、ORNL、UTK、GE-Hitachi	以一个具有非能动安全系统、水冷自然循环的 BWRX-300 小型模块化反应堆为参考, 建立其关键组件的数字孪生体, 并利用 AI 预测技术做出风险知情决策。	5412810
MIT	GER、GE-Hitachi	用于 BWRX-300 关键系统的高保真数字孪生体。数字孪生体将解决驱动操作和维护活动的机械和热疲劳失效模式。	1787065
	—	产生用于 MSR(molten salt reactor)数字孪生体的关键辐照数据, 了解 MSR 中生成的放射性材料的行为对其设计、预测和降低 O&M 成本	899825
EPRI	MIT	“替换和翻新”: 降低先进反应堆 O&M 成本的新模式	999464
Framatome	ANL	使用 Metroscope 对 HTGR(high temperature gas-cooled reactor)反应堆腔冷却系统进行基于数字孪生的资产性能和可靠性诊断	809701
Moltex	ANL	智能、高效、数字化的自动发电厂的研究, 降低盐堆-废渣燃烧器生产核能的成本	3500000

France, EDF)、Framatome、法国原子能和替代能源委员会(Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, CEA), 及此外 6 个机构启动了数字反应堆构造项目 PSPC(le Projet Structurant Pour la Compétitivité)。该项目预期数字化克隆法国所有核反应堆机组。这一面向核工业未来的计划将为所有运营商提供一个数字孪生系统。此外, EDF、达索系统、凯捷咨询(Capgemini)公司签署了长期合作协议, 共同推进核工程系统的数字化转型, 在核电项目设计、建设、运营阶段引入先进的数字孪生解决方案。

中核集团的数字化转型战略中提到, 到 2035—2040 年, 预期全面实现现实世界中核工业与核工业虚拟孪生体的智能共生^[43]; 并设立有中国核动力研究设计院等多家单位参与的核能软件与数字化反应堆工程技术研究中心, 组建了研发团队来推进数字反应堆技术研发并取得显著成果。同时, 中国核动力研究设计院对于数字孪生在核仪控 DCS 中的设计框架及应用进行了相关探索^[22]。核动力运行研究所也对数字孪生技术在核电站的应用进行了初步分析和探讨^[44]。

由核电安全监控技术与装备国家重点实验室承办的 2020 平行智能大会上, 与会专家就核电厂智能化技术应用、数字孪生创新生态建设等问题开展了交流^[45]。同年 12 月, 在中国工业互联网大赛中, 中国广核研究院申报的“数字孪生核电厂建设及运维领域应用解决方案”获得优秀作品奖^[46]。

由此可见, 各国正加快对数字孪生的研究及应用布局, 全球许多研究机构对先进核能领域应用数字孪生技术的规划正在部署, 将进一步推动核能应用的数字化、安全化、便捷化。本节将从核电站、空间反应堆及小型模块堆 3 个方面介绍进行数字孪生技术的应用前景及部分正在及拟开展的项目。

2.1 核电站数字孪生

切尔诺贝利核事故、三里岛核事故及福岛核事故影响了全球核电的发展, 安全保障成为核电发展的首要前提^[47-49]。对于核电站操作人员, 一个重要训练手段是采用全范围仿真机^[50]。与其他行业不同, 核工业一般难以使用完整的核反应堆进行持续实验。因此, 对于数字孪生技术的需求更为迫切。在核电站建成后, 数字堆和实体堆继续进行信息交互, 保持状态同步。另可借助大数据、机器学习等技术推测一些难以测量或预测的指标或工况, 从而提供更全面的评估、诊断和预测^[51-52]。有研究者^[14]

对数字孪生技术在核领域的作用提出质疑。但不可否认的是, 目前对核反应堆进行安全分析^[53-54]时由于模型不确定性^[55]、比例缩放不确定性^[56]等导致结果具有不确定性, 而在数字孪生平台上可耦合各种数据以量化不确定性, 减少不必要的保守性, 这将为核电站的安全性及经济效益带来福音^[57]。

美国 GEMINA 项目中, NCSU 与 X-Energy 将使用人因工程、概率风险评估、危害分析、安全和维护评估, 以确定 O&M 优化领域。此外, X-Energy 将利用自动化、机器人技术、远程和集中维护以及监控等先进技术来优化人员配备计划, 同时确保电站优化运行。UM 将开发 AI 增强型核反应堆“数字孪生体”, 首先使用运行的熔盐回路验证该产品, 并将其应用于 Kairos 公司的氟化物盐冷高温反应堆的设计, 以示范如何将设计功能用于优化电站设计中。ANL 与不同机构合作, 主要研究四项课题, 力图使核电比化石燃料发电更具竞争力。MIT 将对熔盐反应堆核燃料在流经堆芯时发生裂变的过程进行研究。

此外, 英国核燃料(British Nuclear Fuel Corporation, BNFL)公司构造了虚拟中央控制室来优化其结构和布局, 充分考虑人因^[58]; EDF 安装了一套虚拟现实系统, 用于将数字孪生技术应用于核电站操作程序的设计及测试。研究者^[59]使用 Unreal 引擎建立了 TRIGA(training, research, isotopes, general atomics)反应堆模型, 可用于培训核电站操作人员。

数字孪生技术用于核电厂已呼之欲出, 其必要性主要体现在以下几点: 1) 现已积累大量核电站相关数据及文档, 但其系统复杂, 通常难以理解参数间、组件间深层联系, 在数字化空间进行全系统建模可加深对数据的理解和灵活运用。2) 由于数字化设计可更改, 对于系统复杂、机理知识未完全掌握的核电站系统, 可进行虚拟组装、拆卸、尺寸校对, 减少不必要的制造工序及材料。3) 数字孪生体实时映射真实核电站, 可实现技术及管理人员对核电站状态的在线监测。4) 核反应堆组件大多处于压力及温度状态恶劣的环境中, 对其进行定时的寿命预测及健康管理可让操作人员及时发现需更换的部件, 避免故障发生。5) 利用数字孪生系统的实时仿真模拟功能, 还可对核电站某些参数出现异常时进行故障诊断及处理。其可行性主要体现在: 1) 航空航天及船舶等领域已有较为详细的数字孪生应用的研究案例, 核电领域发展数字孪生技术可借鉴。2) 核电领域已积累大量的可信数据,

可用于仿真模型的验证及确认。3) 目前我国正处于稳步发展核电及数字化转型的关键阶段，数字反应堆研究已有较好的基础和进展，对核电厂的数字孪生体开发正当其时。

构建一个具有研究意义的数字孪生体大致可分为6步^[60]，作为一种初步尝试，结合数字孪生五维模型^[7]、多维风险评估模型^[61]及核安全管理导则^[62]有关规定，本文将核电站数字孪生的多维评估数字模型展开为

$$R_M = (R_{PE}, R_{VE}, S_S, BE, DD, CN) \quad (1)$$

式中： R_M 表示核反应多维评估模型，其数据结构如图2所示； R_{PE} 表示图3中真实反应堆，分为单元级、系统级、复杂系统级3个层次^[7]； R_{VE} 表示虚拟孪生反应堆，数学表示如式(2)^[7]所示； S_S 表示对反应堆进行热工水力与安全分析评估； BE 表示核监管局认可的用于计算评估核电站安全性的最佳估算加不确定性方法，如CSAU方法^[63]； DD 表示历史(DD_h)和实时(DD_r)数据，如式(3)所示； CN 表示各部分之间的连接。

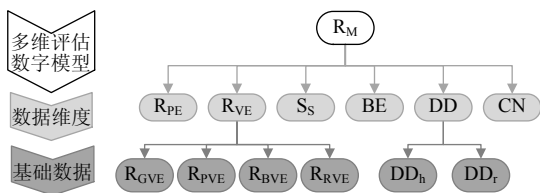


图2 多维评估数字模型数据结构

Fig. 2 Multi-dimensional evaluation digital model data structure

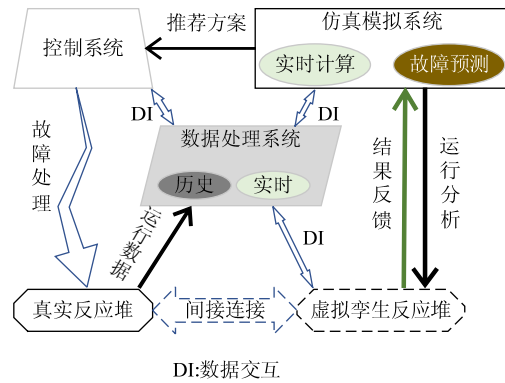
$$R_{VE} = (R_{GVE}, R_{PVE}, R_{BVE}, R_{RVE}) \quad (2)$$

式中： R_{GVE} 为描述 R_{PE} 的几何模型，包括几何参数、装配关系等； R_{PVE} 为反应堆内现象机理模型，如流体的流型模型^[64-66]； R_{BVE} 为行为模型，用以描述人为干扰及内部运行机制等共同作用下产生的实时响应及行为； R_{RVE} 为规则模型，包括基于历史关联数据的规律规则、基于隐性知识总结的经验，以及核安全分析标准与准则等。

$$DD = (DD_h, DD_r) \quad (3)$$

式中： DD_h 为历史数据，包括反应堆几何尺寸、专家经验、行业准则、数据处理方法、融合/衍生数据等； DD_r 为实时数据，包括运行参数、运行状态、实时模拟预测结果等。

图3示出了实现核电站数字孪生的几个关键模块及运行机理，各模块间的数据标准化以共享是需要解决的关键技术之一。为解决此问题，在建模之初可以开发统一建模平台及语言，尽量解决在不同平台对核电站不同部件特性的模拟进行耦合时可能出现的不兼容问题。数字孪生核电站建成后，系



DI:数据交互

图3 数字孪生核电站系统运行机理

Fig. 3 System operation mechanism of digital twin nuclear power plant

统性验证是至关重要的一个环节，功能实现需要考虑系统及组件之间的关系，Trevanii 等人^[67]提出可借鉴航空工业中的金字塔层次结构，Patterson 等人^[14]结合现有的核模型和仿真程序的学习，为核电站建造了一个示例金字塔，为验证每个级别的模型以及层次结构中的关系提供参考。

数字孪生核电站发展到高智能阶段后，则有望通过自动的状态监测、智能化的分析判断、自主化的指令反馈来实现对实体核电站的异常工况干预，避免事故的发生，从而真正实现现实意义上的“无人核电站”。

2.2 空间核反应堆数字孪生

空间核反应堆能量密度大，能够大功率供电、全天候工作、环境适应性好，是航天以及外太空探测的优选电源^[68]。最早对空间核反应堆进行研究的是美国和前苏联，美国成功发射世界上第一个空间核反应堆电源 SNAP-10A^[69]。作为早期小型空间堆的应用，俄罗斯/前苏联开发了4个主要型号 (Romashka^[70]、TOPAZ-I^[71]、BUK^[71]和 TOPAZ-II^[71]) 的空间堆电源。早期应用于航天领域的数字孪生技术在空间反应堆上有着广阔的应用前景。

我国已制定了空间核动力推进尤其是核电源方面的技术发展规划。2015年，中国航天科技集团公司与中国原子能科学研究院、北京航空航天大学等单位联合成立空间核动力推进技术联合实验室，开展相关研究^[72]。中国科学院核能安全技术研究所等相关单位也开展了 MW 级超小型液态金属冷却空间核反应堆方面的研究^[73]。

2015年，MIT、美国融合媒体集团及 NASA 在 VR 体验项目“Mars 2030”上建立合作关系^[74]。

“Mars 2030”于2017年7月发布，并连同其编辑工具套件已被 NASA 用于构建太空模拟系统^[75]。

“Mars 2030”编辑器由虚幻引擎4(Unreal Engine 4)

提供动力,并具有用于构建火星 2030 的所有 3D 模型、资产、地形、系统。

当前,各国对外太空的争夺日趋激烈,发展空间核动力对科研、军事等具有重要战略意义。数字孪生技术应用于空间动力装置的构想类似于航空航天业中的飞行器孪生体。作为空间反应堆的数字孪生体,虚拟空间反应堆需要基于高性能大规模硬件的物理仿真系统,利用更为先进精细的空间反应堆理论模型和数值计算软件,实现对关键性能、参数、行为的精细化计算分析与预测。

2.3 小型模块堆数字孪生

小型模块化反应堆(small modular reactor, SMR)^[76]指发电功率小于 300MW、采用模块化设计、设备系统模块化工厂预测和现场模块化组装建设的小型反应堆。SMR 的高安全性和灵活性,是裂变反应堆的重要发展方向之一^[77],而数字孪生技术有望率先在小型堆的研发上得到应用。

美国能源部于 2020 年 5 月启动了先进反应堆示范计划(Advanced Reactor Demonstration Program, ARDP),用于建造先进反应堆。ARDP 主要在反应堆构建、运行设计、减少演示风险等方面进行研究,为反应堆创新和多样化设计提供支持。GEMINA 项目中由 GE 领导的团队将构建 BWRX-300 小型堆关键部件的数字孪生模型,并利用 AI 预测技术做出风险知情决策;由 MIT 领导的团队将对 BWRX-300 系统的高保真数字孪生体进行组装、验证和测试,推进并演示新的预测性维修方法和基于模型的故障系统检测技术。通过简化设计,BWRX-300 每 MW 的成本将大大低于其他水冷式 SMR 设计或现有大型反应堆。

碳中和目标的实现、电力负荷需求以及代替部分大型核反应堆的可能性,使 SMR 有更广阔的应用空间。单个 SMR 的结构简单、设计灵活、建造成本低于大型反应堆。由于不同核燃料对冷却剂、慢化剂要求不同,在集成建造时阶段的优化布局,可通过虚拟空间的数字孪生体进行多次设计模拟,达到最优,减少建造及试错成本。

3 月基核反应堆数字孪生技术应用场景探索

核反应堆是融合了热工、流体、物理、机械、控制、结构等学科分支的复杂系统,除用于陆上电站外,不同形式的反应堆也开始在舰船、海上、太空等区域得到应用。此前有报道美国、俄罗斯等国家已有计划在月球上建造核反应堆。月基核反应堆是为月球基地提供长期能源的重要选项,其研究与

开发是当前的高技术竞争热点。目前月基核反应堆还面临自主操控及长期服役的问题,数字孪生技术是解决这些问题的有效手段之一。

由于月基反应堆远离地球,在地面上部署其数字孪生体是实现远程监测与无人运行的一个显著需求。通过实现月基对象的数字孪生,则在地面即可实现远程操控。参考舰船领域应用数字孪生技术的研究^[78],本文对月基核反应堆电源^[79]数字孪生技术的应用场景进行探索。

一个完整的月基核反应堆数字孪生系统大致可包括如下子系统:物理实体反应堆、数字孪生反应堆、数据处理系统、仿真模拟系统及控制系统。设计过程中 CAD 和 ANSYS 等几何参数、热工水力和中子辐射屏蔽等物理模型、能量转换方式及运行经验等数据都存储于数据处理系统。堆芯、发动机、支撑架、辐射器等零部件或子系统设计完成后进行数字化、系统级自上而下及自下而上的仿真及验证,弥补传统设计过程中基于文档的建模方法在耦合方面的不足。月基核反应堆部署完成后,安装的传感器采集实时运行、环境数据并存储于数据处理系统,供地面的数字孪生反应堆保持同步运行及仿真模拟系统的实时预测。

如数字孪生系统的实时预测功能可用于月基反应堆的辅助决策、故障诊断及寿命预测。以热管冷却型月基反应堆^[80]堆芯内热管发生故障为例分析数字孪生系统的故障诊断功能。某时刻月基反应堆堆芯内部分热管出现故障,无法有效导出燃料棒的热量,其余正常工作的热管绝热段温度将升高,传感器监测到该异常数据后地面控制端出现警报,而仿真模拟系统读取数据处理系统的当前数据同步预测出由该异常可能导致事故后果(如燃料包壳峰值温度超过安全值),同时依据历史计算数据、维修保障数据等进行故障定位,找出处于异常状态的位置,并在控制系统用户端形成可视化数据图景,给出可视化故障信息。此外,仿真模拟系统还可根据当前故障计算出可行措施,控制室操作人员根据仿真模拟系统推荐的指令/措施及时、定点地对月基物理反应堆进行远程干预,预防故障或者自动解决故障。

4 结论

数字孪生技术逐渐应用于越来越多的领域,包括核能。美国、法国等国家已启动了 GEMINA、PSPC 等相关研究计划,为数字孪生技术用于核能领域的研发工作提供支持,我国许多机构也先后开始了相关研究。

数字化是提高核能竞争力和效率的关键技术之一, 在核电站、空间核反应堆、小型模块堆等核能系统使用数字孪生技术是目前热门研究课题。本文介绍了国内外对数字孪生技术的研究, 包括美国的 GEMINA 项目等; 随后提出了核领域应用数字孪生技术的基本概念模型; 同时, 数字孪生技术有望率先在小型模块堆、空间反应堆的研发上得到应用。不过, 数字孪生技术在核能领域中的应用近几年才受到关注, 研发尚处于初级阶段。未来, 数字孪生技术预期在核电厂智能运维、故障预测, 空间反应堆和小型堆设计运行、故障诊断及预防等先进核能领域中得到广泛的应用。

参考文献

- [1] GRIEVES M, VICKERS J. Transdisciplinary perspectives on complex systems: digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]. Cham: Springer, 2017: 85-113.
- [2] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.
TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18(in Chinese).
- [3] SCHLUSE M, ROSSMANN J. From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems[C]//2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE). Edinburgh: IEEE, 2016: 1-6.
- [4] KHARLAMOV E, MARTIN-RECUERDA F, PERRY B, et al. Towards semantically enhanced digital twins[C]//Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). Seattle: IEEE, 2018: 4189-4193.
- [5] GRIEVES M W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises[J]. International Journal of Product Development, 2005, 2(1): 71-84.
- [6] KE Shiqian, XIANG Feng, ZHANG Zhi, et al. A enhanced interaction framework based on VR, AR and MR in digital twin[J]. Procedia CIRP, 2019(83): 753-758.
- [7] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.
TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18(in Chinese).
- [8] HAAG S, ANDERL R. Digital twin-proof of concept[J]. Manufacturing Letters, 2018(15): 64-66.
- [9] 赵波, 程多福, 贺东东, 等. 数字孪生应用白皮书[M]. 北京: 中国电子技术标准化研究院, 2020.
- [10] PETTI D, BUONGIORNO P J, CORRADINI M, et al. The future of nuclear energy in a carbon-constrained world[R/OL]. [2021-03-01]. <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2018/09/The-Future-of-Nuclear-Energy-in-a-Carbon-Constrained-World.pdf>.
- [11] SIEMENS. Towards a Virtual Reactor: the birth of the nuclear digital twin[EB/OL]. [2021-03-01]. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/zh/resource/nuclear-digital-twin/88629>.
- [12] DOE. DOE announces \$27 million for advanced nuclear reactor systems operational technology[N]. DOE Announces, 2020-05-13.
- [13] ARPA-E. GEMINA—generating electricity managed by intelligent nuclear assets[N]. Project Descriptions, 2020-05-13.
- [14] PATTERSON E A, TAYLOR R J, BANKHEAD M. A framework for an integrated nuclear digital environment[J]. Progress in Nuclear Energy, 2016(87): 97-103.
- [15] 陶飞, 张萌, 程江峰, 等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1): 1-9.
TAO Fei, ZHANG Meng, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1): 1-9(in Chinese).
- [16] SCHLEICH B, ANWER N, MATHIEU L, et al. Shaping the digital twin for design and production engineering[J]. CIRP Annals, 2017, 66(1): 141-144.
- [17] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 753-768.
ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, XIONG Hui, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 753-768(in Chinese).
- [18] 于勇, 范胜廷, 彭关伟, 等. 数字孪生模型在产品构型管理中应用探讨[J]. 航空制造技术, 2017(7): 41-45.
YU Yong, FAN Shengting, PENG Guanwei, et al. Study on application of digital twin model in product configuration management[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(7): 41-45(in Chinese).
- [19] TAO Fei, ZHANG Meng, LIU Yushan, et al. Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment[J]. CIRP Annals, 2018, 67(1): 169-172.
- [20] 陶飞, 马昕, 胡天亮, 等. 数字孪生标准体系[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(10): 2405-2418.
TAO Fei, MA Xin, HU Tianliang, et al. Research on digital twin standard system[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(10): 2405-2418(in Chinese).
- [21] 赵浩然, 刘检华, 熊辉, 等. 面向数字孪生车间的三维可视化实时监控方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1432-1443.
ZHAO Haoran, LIU Jianhua, XIONG Hui, et al. 3D visualization real-time monitoring method for digital twin workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1432-1443(in Chinese).
- [22] 王恺, 马权, 杨宗昊, 等. 数字孪生在核仪控 DCS 中的设计框架及应用探索[J]. 仪器仪表用户, 2019, 26(11): 43-47.
WANG Kai, MA Quan, YANG Zonghao, et al. Design framework and application exploration in nuclear I&C DCS based on digital twin technology[J]. Instrumentation Customer, 2019, 26(11): 43-47(in Chinese).
- [23] 刘蔚然, 陶飞, 程江峰, 等. 数字孪生卫星: 概念、关键技术及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(3): 565-588.
LIU Weiran, TAO Fei, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin satellite: concept, key technologies and applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(3): 565-588(in Chinese).
- [24] 杜华, 罗英, 余志伟, 等. 智能技术与反应堆结构设计的结合[J]. 科技创新与应用, 2021(3): 98-100.
- [25] RICKS T M, LACY T E, PINEDA E J, et al. Computationally efficient solution of the high-fidelity generalized method of cells micromechanics relations[C]//American Society for Composites 30th Annual Technical Conference. East Lansing: American Society for Composites 30th Annual Technical Conference, 2015: 28-30.
- [26] CAI Yi, STARLY B, COHEN P, et al. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing[J]. Procedia Manufacturing, 2017(10): 1031-1042.
- [27] UHLEMANN T H-J, LEHMANN C, STEINHILPER R. The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for industry 4.0[J]. Procedia CIRP, 2017(61): 335-340.
- [28] FERGUSON S, BENNETT E, IVASHCHENKO A. Digital twin

- tackles design challenges[J]. *World Pumps*, 2017(4): 26-28.
- [29] 宋悦, 时玮瑜, 于劲松, 等. 基于数字孪生的光电探测系统性能预测[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(6): 1559-1567. SONG Yue, SHI Yiyu, YU Jinsong, et al. Application of digital twin model in performance prediction of electro-optical detection system[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(6): 1559-1567(in Chinese).
- [30] LUO Weichao, HU Tianliang, ZHANG Chengrui, et al. Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2019, 10(3): 1129-1140.
- [31] RASHEED A, SAN O, KVAMSDAL T. Digital twin: values, challenges and enablers from a modeling perspective[J]. *IEEE Access*, 2020(8): 21980-22012.
- [32] FULLER A, FAN Zhong, DAY C, et al. Digital twin: enabling technologies, challenges and open research[J]. *IEEE Access*, 2020(8): 108952-108971.
- [33] UM J, WEYER S, QUINT F. Plug-and-simulate within modular assembly line enabled by digital twins and the use of automationml[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, 50(1): 15904-15909.
- [34] 魏一雄, 郭磊, 陈亮希, 等. 基于实时数据驱动的数字孪生车间研究及实现[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(2): 352-363. WEI Yixiong, GUO Lei, CHEN Liangxi, et al. Research and implementation of digital twin workshop based on real-time data driven[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(2): 352-363(in Chinese).
- [35] TUEGEL E J, INGRAFEEA A R, EASON T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011: 1-14. DOI: 10.1155/2011/154798.
- [36] ZHANG Hao, LIU Qiang, CHEN Xin, et al. A digital twin-based approach for designing and multi-objective optimization of hollow glass production line[J]. *IEEE Access*, 2017(5): 26901-26911.
- [37] SESHADRI B R, KRISHNAMURTHY T. Structural health management of damaged aircraft structures using digital twin concept[C]//*Proceedings of the 25th AIAA/AHS Adaptive Structures Conference*. Grapevine: AIAA, 2017: 1-13.
- [38] BANKHEAD M, MACDONALD-TAYLOR K F J, TRIVEDI D, et al. Digital twin of nuclear waste management facilities[C]//*8th International Workshop on Reliable Engineering Computing*. Liverpool, UK: University of Liverpool, 2018: 1-7.
- [39] 张立静, 盛戈皞, 侯慧娟, 等. 基于电热特性融合分析的油浸式变压器匝间短路故障辨识方法[J/OL]. *电网技术*, (2021-01-15). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?doi=10.13335/j.1000-3673.pst.2020.2054>. ZHANG Lijing, SHENG Gehao, HOU Huijuan, et al. Detection method of interturn short-circuit faults in oil-immersed transformers based on fusion analysis of electrothermal characteristic[J/OL]. *Power System Technology*, (2021-01-15). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?doi=10.13335/j.1000-3673.pst.2020.2054>(in Chinese).
- [40] 孙荣富, 王隆扬, 王玉林, 等. 基于数字孪生的光伏发电功率超短期预测[J]. *电网技术*, 2021, 45(4): 1258-1264. SUN Rongfu, WANG Longyang, WANG Yulin, et al. Ultra-short-term prediction of photovoltaic power generation based on digital twins[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(4): 1258-1264(in Chinese).
- [41] 刘宇凝, 王迎丽, 徐明文, 等. 基于数字孪生混合储能的风电功率波动平抑策略[J/OL]. *电网技术*, (2021-03-02). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?doi=10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0188>. LIU Yuning, WANG Yingli, XU Mingwen, et al. Strategy of wind power fluctuation smooth based on digital twin hybrid energy storage[J/OL]. *Power System Technology*, (2021-03-02). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?doi=10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0188>(in Chinese).
- [42] 高扬, 贺兴, 艾芊. 基于数字孪生驱动的智慧微电网多智能体协调优化控制策略[J]. *电网技术*, (2021-04-09). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?doi=10.13335/j.1000-3673.pst.2020.2278>. GAO Yang, HE Xing, AI Qian. Multi agent coordinated optimal control strategy for smart microgrid based on digital twin drive[J/OL]. *Power System Technology*, (2021-04-09). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?doi=10.13335/j.1000-3673.pst.2020.2278>(in Chinese).
- [43] 中国核电网. 打造“云上中核”中核集团加速“智慧”变身[EB/OL]. [2020-11-16]. <https://www.cnnpn.cn/article/22087.html>.
- [44] 潘保林, 邹金强, 毛志新, 等. 数字孪生技术在核电站的应用分析[J]. *中国核电*, 2020, 13(5): 587-591. PAN Baolin, ZOU Jinqiang, MAO Zhixin, et al. Application of digital twin technology in nuclear power plant[J]. *China Nuclear Power*, 2020, 13(5): 587-591(in Chinese).
- [45] 业界观察. 2020 平行智能大会将于 9 月 19 日在青岛召开[EB/OL]. [2020-09-19]. https://www.sohu.com/a/416437088_99981592.2020.
- [46] 核家大院. 中广核研究院数字孪生核电厂荣获中国工业互联网大赛优秀奖[EB/OL]. [2020-12-07]. https://www.sohu.com/a/436855928_707297.
- [47] 周涛, 陆道纲, 李悠然. 核安全文化与中国核电发展[J]. *现代电力*, 2006, 23(5): 16-23.
- [48] 吴玉林, 陈志刚. 中国核核电安全文化建设实践及思考[J]. *环境保护*, 2018, 46(12): 36-38. WU Yulin, CHEN Zhigang. Summary and cogitation of china nuclear power industry safety culture construction[J]. *Environmental Protection*, 2018, 46(12): 36-38(in Chinese).
- [49] 白弢, 张立强. 浅论核电发展新时代核安全文化建设[J]. *中小企业管理与科技(上旬刊)*, 2019(2): 140-141. BAI Tao, ZHANG Liqiang. Discussion on the construction of nuclear safety culture in the new era of nuclear power development[J]. *Management & Technology of SME*, 2019(2): 140-141(in Chinese).
- [50] 冷杉. 秦山 300MW 核电站全范围仿真系统[J]. *中国电机工程学报*, 1997, 17(1): 48-53. LENG Shan. Qinshan 300MW nuclear power plant full scope training simulation system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 1997, 17(1): 48-53(in Chinese).
- [51] 江秀臣, 盛戈皞. 电力设备状态大数据分析的研究和应用[J]. *高压电压技术*, 2018, 44(4): 1041-1050. JIANG Xiuchen, SHENG Gehao. Research and application of big data analysis of power equipment condition[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(4): 1041-1050(in Chinese).
- [52] 龙虎, 李娜. 大数据技术下的机器学习平台构建研究[J]. *电脑知识与技术*, 2019, 15(10): 157-159. LONG Hu, LI Na. Research on the construction of machine learning platform under big data technology[J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2019, 15(10): 157-159(in Chinese).
- [53] YANG Jun, YANG Ye, DENG Chengcheng, et al. Best estimate plus uncertainty analysis of a large break LOCA on generation III reactor with RELAP5[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2019(127): 326-340.
- [54] YANG Ye, DENG Chengcheng, YANG Jun. Best estimate plus uncertainty analysis of a small - break LOCA on an advanced generation - III pressurized water reactor[J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, DOI: 10.1002/er.5920.
- [55] POURGOL-MOHAMAD M, MOSLEH A, MODARRES M. Structured treatment of model uncertainty in complex thermal-hydraulics codes: technical challenges, prospective and characterization[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, 241(1): 285-295.
- [56] D'AURIA F, GALASSI G M. Scaling in nuclear reactor system

- thermal-hydraulics[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240(10): 3267-3293.
- [57] BUCALOSSI A, PETRUZZI A, KRISTOF M, et al. Comparison between best-estimate-plus-uncertainty methods and conservative tools for nuclear power plant licensing[J]. Nuclear Technology, 2010, 172(1): 29-47.
- [58] REED J, TUNLEY C. The application of advanced visualisation and simulation techniques in control room design and operator training [nuclear power plants][C]//Proceedings of the 1997 IEEE Sixth Conference on Human Factors and Power Plants, "Global Perspectives of Human Factors in Power Generation". Orlando: IEEE, 1997: 13-18.
- [59] DIXON J, MARKIDIS S, LUO Cheng, et al. Three-dimensional, virtual, game-like environments for education and training[J]. Transactions, 2007, 97(1): 915-917.
- [60] TAO Fei, SUI Fangyuan, LIU Ang, et al. Digital twin-driven product design framework[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(12): 3935-3953.
- [61] LIU Zhansheng, BAI Wenyan, DU Xiuli, et al. Digital twin-based safety evaluation of prestressed steel structure[J]. Advances in Civil Engineering, 2020: 1-10, DOI: 10.1155/2020/8888876.
- [62] U.S. Nuclear Regulatory Commission. Title 10, "Energy", Part 50, "Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities", Sec.50.46, "Acceptance Criteria for Emergency Core Cooling Systems for Light-Water Nuclear Power Reactors"[Z]. USA: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1996.
- [63] BOYACK B E, CATTON I, DUFFEY R B, et al. Quantifying reactor safety margins part 1: an overview of the code scaling, applicability, and uncertainty evaluation methodology[J]. Nuclear Engineering and Design, 1990, 119(1): 1-15.
- [64] RADOVICICH N A. The transition from two phase bubble flow to slug flow[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1962.
- [65] GRIFFITH P, SNYDER G A. The bubbly-slug transition in a high velocity two phase flow[R]. Cambridge: MIT Division of Sponsored Research, 1964.
- [66] MANDHANE J M, GREGORY G A, AZIZ K. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1974, 1(4): 537-553.
- [67] TREVISANI D A, SISTI A F. Air Force hierarchy of models: a look inside the great pyramid[C]//Enabling Technology for Simulation Science IV. Orlando: International Society for Optics and Photonics, 2000, 4026: 150-159.
- [68] 张梦龙, 张悦, 王宝和. 空间核推进系统综述与展望[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(9): 96-100.
ZHANG Menglong, ZHANG Yue, WANG Baohe. Review and prospect of space nuclear propulsion system[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(9): 96-100(in Chinese).
- [69] JOHNSON R A, MORGAN W T, ROCKLIN S R. Design, ground test and flight test of SNAP 10A, first reactor in space[J]. Nuclear Engineering and Design, 1967, 5(1): 7-21.
- [70] MILLIONSHCHIKOV M D, GVERDTSITELI I G, ABRAMOV A S, et al. High-temperature reactor-converter "Romashka"[J]. Soviet Atomic Energy, 1964, 17(5): 1071-1077.
- [71] 苏著亭, 杨继材, 柯国土. 空间核动力[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2016.
- [72] 科技日报. 我国首个空间核推进技术联合实验室成立[EB/OL]. [2015-08-31]. http://www.cas.cn/kj/201508/t20150831_4418088.shtml.
- [73] 杨军, 张恩昊, 郭志恒, 等. 全球核能科技前沿综述[J]. 科技导报, 2020, 38(20): 35-49.
YANG Jun, ZHANG Enhao, GUO Zhiheng, et al. Recent progress of frontier nuclear energy science and technology[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(20): 35-49(in Chinese).
- [74] GRAHAM P. Experience what the first manned mission could be like as mars 2030 launches[EB/OL]. [2017-07-31]. <https://www.vrfocus.com/2017/07/experience-what-the-first-manned-mission-could-be-like-as-mars-2030-launches/>.
- [75] POTENZA A. The Mars 2030 VR experience takes all the stakes out of a Mars mission[EB/OL]. [2017-07-31]. <https://www.theverge.com/2017/7/31/15947348/mars-2030-vr-experience-fusion-media-nasa>.
- [76] INGERSOLL D T, CARELLI M D. Handbook of small modular nuclear reactors[M]. Amsterdam: Woodhead Publishing, Elsevier, 2015.
- [77] 刘思佳, 朱贵凤, 严睿, 等. 小型模块化氟盐冷却高温堆可燃毒物布置方案[J]. 核技术, 2020, 43(5): 61-66.
LIU Sijia, ZHU Guifeng, YAN Rui, et al. Placement scheme of burnable poisons in a small modular fluoride-cooled high temperature reactor[J]. Nuclear Techniques, 2020, 43(5): 61-66(in Chinese).
- [78] 李凯, 钱浩, 龚梦瑶, 等. 基于数字孪生技术的数字化舰船及其应用探索[J]. 船舶, 2018, 29(6): 101-108.
LI Kai, QIAN Hao, GONG Mengyao, et al. Digital warship and its application exploration based on digital twin technology[J]. Ship & Boat, 2018, 29(6): 101-108(in Chinese).
- [79] 姚成志, 胡古, 解家春, 等. 月球基地核电源系统方案研究[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(3): 464-470.
YAO Chengzhi, HU Gu, XIE Jiachun, et al. Scheme research of nuclear reactor power system for lunar base[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(3): 464-470(in Chinese).
- [80] EL-GENK M S, TOURNIER J M. Conceptual design of HP - STMCs space reactor power system for 110kWe[C]//AIP Conference Proceedings. Maryland: American Institute of Physics, 2004, 699(1): 658-672.



胡梦岩

在线出版日期: 2021-04-29.

收稿日期: 2021-03-02.

作者简介:

胡梦岩(1996), 女, 硕士研究生, 研究方向为反应堆热工水力, E-mail: hu_my@hust.edu.cn;

孔繁丽(1996), 女, 博士研究生, 研究方向为反应堆热工水力, E-mail: flkong@mail.ustc.edu.cn;

余大利(1989), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为反应堆热工水力等, E-mail: dlyu@inest.cas.cn;

杨军(1979), 男, 博士, 教授, 通信作者, 研究方向为反应堆热工水力与安全分析等, E-mail: yang_jun@hust.edu.cn.

(责任编辑 徐梅)