

数字孪生在核电设备领域中的关键技术应用研究综述

景晓冬^{1,2}, 郭景昌^{1,2}, 严家福^{1,2}

(1. 中广核工程有限公司, 广东 深圳 518172;

2. 核电安全监控技术与装备国家重点实验室, 广东 深圳 518172)

摘要: 随着数字孪生(Digital Twin)理论和技术不断发展,其在复杂装备产品领域中已经显现出了广泛的应用价值。核电设备是核电厂安全运行的重要保障,具有结构复杂、服役周期长、运行环境恶劣、质量和可靠性要求高等特点。本文首先阐述了数字孪生起源与发展,其次分析核电设备应用研究现状以及共性关键技术,最后以核电设备全生命周期作为应用场景,给出数字孪生技术应用解决方案以及面临的问题,对进一步提高核电设备数字化和智能化水平具有较强的借鉴意义和技术可行性。

关键词: 核电设备;数字孪生;故障预测;健康管理

中图分类号:TP15;TP391.9 文献标识码:A 文章编号:1003-7241(2025)03-0001-06

Review of Key Technology Application Research on Digital Twins in the Field of Nuclear Power Equipment

JING Xiao-dong^{1,2}, GUO Jing-chang^{1,2}, YAN Jia-fu^{1,2}

(1. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518172 China;

2. State Key Laboratory of Nuclear Power Safety Monitoring Technology and Equipment, Shenzhen 518172 China)

Abstract: With the continuous development of digital twin theory and technology, it shows extensive application value in the field of complex equipment products. Nuclear power equipment is an important guarantee for the safe operation of nuclear power plants. It is characterized by complex structure, long service life, harsh operating environment, high requirements for quality and reliability. This paper first describes the origin and development of digital twin, then analyzes the current application research situation and common key technologies of nuclear power equipment. Finally, taking the full life cycle of nuclear power equipment as the application scenario, this paper presents the application solutions and problems of digital twin technology, which has strong reference significance and technical feasibility for further improving the digital and intelligent level of nuclear power equipment.

Keywords: nuclear power equipment; digital twin; fault prediction; health management

0 引言

当今全球工业互联网、智能制造、大数据、人工智能、云计算、5G等新一代信息技术正进入高速发展时期,为传统行业带来了巨大变革。数字孪生技术作为上述先进技术的集成融合和创新应用,世界各制造强国均给予高度关注,据相关研究机构统计,2020年的全世界数字孪生的市场规模为46亿美元,并预测2026年将达到287亿美元^[1]。数字孪生被全球最具权威的IT研究与顾问咨询机构高德纳公司列为十大战略技术趋势之一。2020年美、德两大制造强国相继成立了数字孪生联盟和工业数字孪生协会。

关于孪生(TWIN)概念最早始于NASA的阿波罗计划,在这个项目中构建了两个空间飞行器,这两个飞行器是完全相同的,位于地面上的空间飞行器被称为孪生(TWIN),是正在执行任务的空间飞行器的镜像,在飞行准备期间

用于人员训练。另一种形式的孪生是铁鸟(Iron Bird),它是在地面搭建的综合试验台架,用于飞机系统综合、优化和验证。随着仿真技术的发展,越来越多的实体部件被铁鸟中的虚拟模型所取代。将开发早期中铁鸟理念进一步延伸到生命周期各个阶段,就形成了一套完整的实体系统数字模型:数字孪生^[2]。2003年迈克尔·格里夫斯博士提出了数字孪生的构想,后来在其著作《产品生命周期管理》一书中提出“信息镜像模型”,作为数字孪生的最初形式,包含了物理实体和虚拟模型,以及二者之间双向数据驱动连接,基本特征已经与数字孪生非常相近^[3]。

与此同时,国内也对数字孪生技术应用给予了高度关注。国资委在《关于加快推进国有企业数字化转型工作的通知》中指出着力提高生产设备数字化率和联网率,提升关键工序数控化率,增强基于数字孪生的设计制造水平,加快形成动态感知、预测预警、自主决策和精准执行能力,全面提升企业研发、设计和生产的智能化水平^[4]。

陶飞等以智能制造为应用场景,提出了数字孪生驱动的6条应用准则以及数字孪生驱动的14类应用设想与实施过程中关键问题与技术^[5]。庄存波等阐明了产品数字孪生体的本质含义,提出了产品数字孪生体体系以及其在产品设计、制造和服务等阶段的实施技术路线及未来发展方向^[6]。针对复杂工业系统和装备的智能运行和维护,刘大同等分析了数字孪生与工业大数据、云计算、人工智能(Artificial Intelligence, AI)、虚拟现实(Virtual Reality, VR)等之间的相关性^[7]。

1 数字孪生技术在核能领域应用研究现状

为积极应对全球气候变暖,我国力争2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和。发电行业的二氧化碳排放量较大,而核电的温室气体排放远低于传统火力发电,核能作为低碳清洁能源,对于减少温室气体排放,减缓全球气候变暖将发挥积极作用,为此我国把“积极安全有序发展核电”作为加快构建清洁低碳安全高效能源体系的重要举措之一^[8]。在人类和平利用核能的过程中,核安全问题一直备受广泛关注,尤其在美国三哩岛核电厂事故、前苏联切尔诺贝利核事故及福岛第一核电站核事故发生后,我国一向把核安全放在和平利用核能事业的首要位置^[9],2017年出台了核安全法,并将核安全纳入了国家安全体系中。

为了防止核泄漏,核电厂采取多重防护、纵深防御原则,在放射性物质和外界环境之间构筑了四道安全屏障。核岛主设备作为第三道屏障,其设计制造质量对核电厂长期安全可靠运行至关重要。核电厂严格的质保体系对核设备设计制造中的过程控制和记录检验可追溯性要求极高;其次核岛主设备制造安装的时间节点构成核电工程建设过程中的重要里程碑,对于动辄数百亿投资规模的核电项目,核岛主设备交付进度对核电厂建造进度和经济性具有较大影响。

数字孪生技术的出现将赋予以核电设备为代表的传统产业全新目标和方向,通过数字孪生技术来提高核电厂的安全性和经济性具有可操作性,以下着重从三个方面进行具体分析:

(1) 我国为实现“双碳”目标,核电建设处于积极有序发展,国家对推进核电装备数字化转型给予了充分支持,为数字孪生在核电领域应用提供了发展契机。工业和信息化部等五部门于2022年8月联合印发了《加快电力装力求绿色低碳创新发展行动计划》,在该行动计划中提出核电装备要满足7000万千瓦的装机需求,为此在“网络化智能化转型发展行动”中提出了要不断加强与新一代信息技术之间的相互融合,加速电力装备产品形态、研发手段、生产方式与服务模式突破创新,实现数字化、绿色化、

服务化发展^[10]。

(2) 数字孪生技术在高端复杂装备已有成熟的应用场景可供核电领域作为实践参考。刘亚东等^[11]认为数字孪生技术是实现电力装备行业数字化转型的重要手段,给出了电力装备数字孪生技术架构以及产业链各环节中数字孪生在智能研发设计、智能制造、供应链动态管理及智能运维管理等的应用场景,最后指出数字孪生技术将会给电力装备行业的生产组织方式、管理方式和商业模式带来深刻的变革。熊明兰等^[12]以数字孪生技术在航空发动机应用为典型,为民机运行安全过程数字孪生提供了技术解决方案。王尚刚等^[13]以数字孪生智慧燃气系统在燃气企业做应用实践,描述了其体系架构和共性关键技术,给出了数字孪生智慧燃气系统中管网设计、完整性管理、巡检、应急、输配调度及用户服务的解决方案。

(3) 国内外研究学者在核电领域数字孪生应用研究奠定了理论基础。Bowman D等^[14]研究了概念验证活动作为数字孪生框架开发的统一方法,并给出了英国核电厂从燃料制造,建造,电力生产,乏燃料管理,退役和废物管理等全生命周期中开发数字孪生集成数字框架的案例。Kochunas^[15]研究了在核电背景环境下对数字孪生概念的理解和定义,并总结了数字孪生技术对于核能的重要性。Arzhaev^[16]数字孪生在核电机组全生命周期各个阶段均是有价值的,是核电厂长期运行期间全部数据收集、管理和记录的有效工具。胡梦岩等^[17]认为在核电站、空间核反应堆以及小型模块化反应堆(Small Modular Reactor, 简称SMR)等领域数字孪生技术具有广阔的应用前景。

2 数字孪生定义与共性关键技术研究

数字孪生是在计算机辅助技术(CAX)、产品生命周期管理(Product Lifecycle Management, PLM)、数字样机(Digital Mock-Up, DMU)、虚拟现实、多学科联合仿真、物联网、深度学习、高性能计算(High Performance Computing, HPC)、人工智能、增材制造、工业互联网以及以5G为代表的新一代通信技术等基础上进行深度融合创新的产物,拓展了上述技术的应用领域和范围,这些技术为数字孪生发展和应用提供了坚实的技术支撑和保障,使其落地生根具备了技术可行性。

目前由于业界各方对于数字孪生的理解角度不同,所以关于数字孪生的定义尚未统一。安世亚太数字孪生体实验室在《数字孪生体白皮书(2019)》中基于美国军方和国外研究机构对数字孪生的定义,认为数字孪生是与物理实体相对应的数字模型,该数字模型可实时采集、仿真模拟和数据分析,动态感知并诊断物理实体状态,并可发送调控指令指挥其行为动作,利用数字模型深度学习

技术对其加以持续改进,在其全寿期内为相关者辅助提供优化决策方案^[18]。陶飞等给出了对数字孪生理解,即“数字孪生作为实现虚实之间双向映射、动态交互、实时连接的关键途径,可将物理实体和系统的属性、结构、状态、性能、功能和行为映射到虚拟世界,形成高保真的动态多维/多尺度/多物理量模型,为观察物理世界、认识物理世界、理解物理世界、控制物理世界、改造物理世界提供了一种有效手段”,同时归纳总结了国内外的数字孪生领域的研究成果,从模型、数据、连接、服务/功能、物理等5个不同维度对数字孪生的特征进行了表述,提出数字孪生的核心要素由物理实体与虚拟模型、二者之间的数据连接、服务所构成^[19]。工四100术语编写组认为数字孪生是基于物理实体的数字化模型、传感器在线实时数据、历史运行数据库,通过集成仿真分析,在数字虚拟环境中构建与物理实体装备相对应的关联映射关系,用以反映其全寿期各阶段演化过程及实时状态^[20]。杨帆等分析了电力装备数字孪生实现所需的关键技术,提出了数字孪生技术架构,如图1所示^[21]。

3 数字孪生技术在核电设备领域中的应用模式

世界核电厂中建造和运行数量上目前占据主要地位的是压水堆核电厂。核电厂的设备类型主要包括机械类设备和电仪类设备,本节着重以机械类设备为例分析数字孪生技术的应用模式。压水堆核电厂主要由核岛和常规岛组成,核岛中的反应堆冷却剂系统由蒸汽发生器、反应堆冷却剂泵、稳压器、主管道等关键设备以及相关卸压系统组成,这些设备与包含反应堆压力容器的堆本体一同构成了完整的热量传递回路;常规岛系统内的核心设备包括汽轮机、发电机、主变压器等。在日本福岛第一核电站核事故后,“华龙一号”作为我国具有自主知识产权的三代先进核电堆型,成为我国当前核电批量化建设的主力堆型。“安全第一,质量第一”是我国核电工程建设的基本原则,我国通过“引进、消化、吸收”国外先进技术的基础上,积极推进自主化设计,进行再创新,核电关键设

备设计和制造自主化水平有了较大飞跃,基本已经实现了国产化。

核电设备特别是核岛主设备相对于一般机电产品的特殊性主要体现在如下4个方面:

- (1) 产品设计要求高、结构复杂、加工难度大、制造周期长,如反应堆压力容器制造周期约在3年左右;
- (2) 核电厂所独有的放射性风险导致对设备安全性、可靠性要求极其严格,如反应堆压力容器设计寿命要求为60年,同时要求安全等级1级、抗震等级SSE(I)、质保等级1级、设计等级核1级;
- (3) 核电设备造价成本高,单台核电机组投资额大约200亿元,其中设备约占核电站总投资的50%;
- (4) 核电工程项目通常采取“工程总承包模式(Engineering Procurement Construction,EPC)”,在该模式中核电设备的设计和制造分别由设计部门、设备采购监督管理部门和制造厂家等多家单位共同承担,导致核电设备设计、采购、制造、运维涉及的合作单位众多,接口关系复杂。

核电厂生命周期大致可分为设计、建造、运行和退役等阶段,其中核电设备作为核电厂重要组成部分,其生命周期同时也贯穿于整个核电厂生命周期中。

3.1 核电设备设计阶段

基于数字孪生的产品设计是以产品数据为驱动,在设计阶段将物理实体与虚拟模型进行双向相互映射,不断优化迭代产品设计原型,并将其转化为产品详细设计,降低最终产品与设计期望间的差异^[5]。以往对于核电设备设计过程中产生的数据和设计经验组织和管理有所欠缺,数字孪生模型作为设计经验和规律的重要载体可为企业解决这些难题。在产品的设计阶段,数字孪生模型在传统三维CAD设计模型基础上,赋予了相关的属性,如材料信息、规范等级、功能位置、质保等级非几何信息。通过多学科联合仿真优化设计,如热工水力分析、动力学分析、应力分析、密封分析、疲劳及断裂分析仿真等代替物理样机提前验证和模拟产品在真实工作环境中的

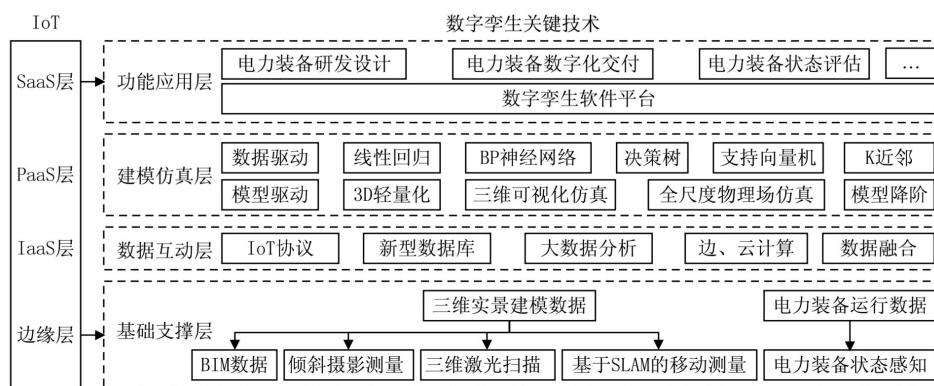


图1 电力装备数字孪生技术架构^[21]

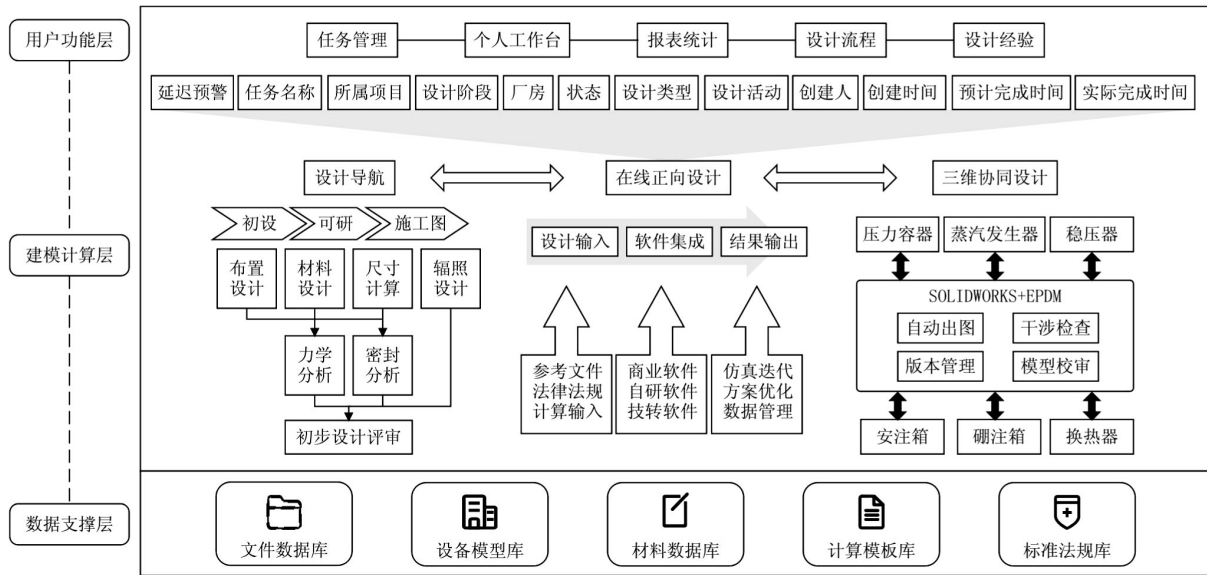


图2 核电设备设计平台框架

性能和功能, 提早消除产品缺陷, 部分代替高成本的物理样机和试验台架。国内某核电设计院基于PLM理念, 利用达索系统公司ENOVIA软件作为基础框架, 以仿真数据管理为驱动, 以产品正向设计过程管理为核心, 为核电设备复杂产品专业设计提供了数字化全专业协同设计研发环境(架构如图2所示), 集成了三维设计和仿真计算软件(包括通用商业软件、自研软件与国外技转软件), 构建了核电设备强度设计模板库、材料力学特性数据库以及三维模型数据库等, 融合了高性能计算资源, 实现了设计工具、数据、流程和知识的固化。

3.2 核电设备制造阶段

传统制造模式下, 设计单位向下游核电设备制造厂传递的是二维的设计图纸, 再由制造厂工艺部门根据制造厂本身的加工设备条件编制相应的工艺流程, 这种模式下各方之间的协作关系较为松散, 与制造厂制造加工过程没有形成更加紧密的数据链协同。通过数字孪生统一的数据和平台, 各方可以结成更为密切的协作关系, 实现产业链供应链协同创新。在设计单位PLM系统中产生的设备三维设计模型以及产品制造信息(Product Manufacturing Information, PMI)通过专有网络向下游设备制造厂传递, 根据制造厂的生产调度计划和加工设备资源, 形成基于三维模型的工艺规程以及作业指导书, 合理安排关键工序, 导入数控加工设备进行制造, 对于一些较为复杂结构且单件小批量产品, 如阀体部件, 通过增材制造技术(如图3所示), 可实现产品快速成型, 提高了产品加工的质量和效率^[22]。在数字孪生系统中模拟设备制造过程, 提前预判关键制造节点及可能存在的风险, 减少不符合项等造成的质量偏差及进度延误, 实现设计单位与制造厂真正意义上的协同, 为彼此带来价值提升。在向

下游制造厂数据传递的过程中, 设计模型需要进行必要的简化, 如去除模型特征树等非必要设计过程信息等, 只保留基本的几何尺寸信息, 并通过访问权限控制等技术手段, 防止模型在由设计单位向制造厂传递过程中被篡改, 保证设计和制造基于统一的数据源, 图4所示为某核电设备制造厂利用设计模型进行了本地转化后的工艺模型, 该模型可导入至计算机辅助工艺过程设计系统(Computer Aided Process Planning, CAPP), 完成三维工艺设计, 用于指导后续工件制造加工过程。

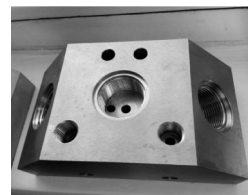


图3 利用增材制造技术的多通道阀体^[22]



图4 某核电设备制造厂三维工艺设计

3.3 核电设备故障预测和健康管理

核电设备故障预测和健康管理(Prognostic and Health Management, PHM)对于保障核电厂安全运行、降低维护成本, 提高经济性意义重大。但由于核电厂部分设备长期处于辐射环境下, 工作环境恶劣, 人员作业条件受到限制, 为核电设备状态准确评估带来困难。

数字孪生技术应用于复杂系统装备的状态监测和剩

余寿命预测方面国内已有典型应用案例。高士根等^[23]针对数字孪生技术在轨道交通系统与装备、能源装备等智能运维领域的发展现状、关键技术及工程应用进行了梳理,提出了系统性“预防修”“状态修”等新特征下的智能运维。为了监测风电机组发电机运行状况,金晓航等^[24]提出一种基于数据采集与监控系统(Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA)数据分析和单分类简化核极限学习机(OC-RKELM)建模的发电机运行状态监测方法,并验证了在风力发电机状态监测结果的有效性。刘惠等^[25]对比了5种基于神经网络算法深度学习方法之间的优劣,认为深度学习在装备剩余使用寿命预测方面可以实现更精确、更鲁棒的效果。刘丽等^[26]针对基于循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)的剩余使用寿命(Remaining Useful Life, RUL)预测模型结构存在的不足,提出了新的用于RUL预测的时间卷积注意力网络(TCAN)模型应用于设备剩余寿命预估。刘文溢等^[27]提出了一种基于高阶隐马尔科夫模型的设备剩余寿命预测方法,该方法用于解决设备剩余寿命预测误差较大的问题,并基于美国Caterpillar公司液泵

数据集开展了验证工作。许勇等^[28]将核电设备状态评估归纳为异常检测、寿命预测和故障诊断三方面问题,认为在设备状态评估过程中通过机器学习为代表的驱动法可大幅提高设备状态评估的精准度。因此通过数字孪生技术构建核电设备故障诊断模型,借助深度学习技术实现核电设备运行状态评估是可行的。

核电设备运行数据主要通过核电厂数字化仪控系统(Digital Control System, DCS)进行获取,DCS是核电厂关键组成部分,为核电厂工艺设备提供各类控制、保护及信息监测,被称作核电厂“中枢神经”。DCS通过各类高性能传感器在线采集核电设备运行关键数据,如一回路压力、堆芯温度、压力容器封头温度等,实时反映到信息监测系统中,通过逻辑运算,将控制指令再传递到人机接口。基于历史数据和监测数据,通过构建核电厂设备状态数据库,建立RUL预测模型,利用深度学习技术,对核电设备进行PHM,从而实现从修复性维护到预防性维护,直至最终向预测性维护的转变,进一步提高机组运行的经济性和可靠性,其基本过程如图5所示。

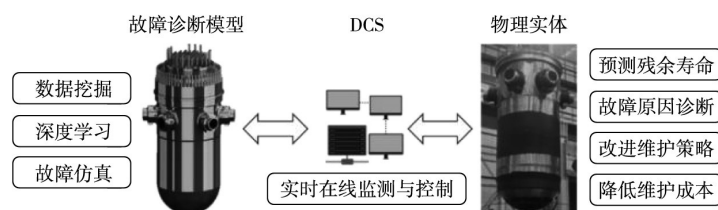


图5 核电设备故障预测和健康管理

3.4 核电厂换料大修阶段



图6 核岛静止主设备4D仿真系统^[31]

核电厂为了更换燃料通常要定期停机,进入换料大修阶段,对核电厂设备进行预防性维修、纠正性维修、工程改造以及在役检查^[29]。核电厂在换料大修期间,作业人员身处核电厂房内开展大修作业活动,不可避免地要接受职业照射剂量。以福清核电为例,一次大修的最大个人剂量为3~5 mSv,一天进出人次峰值可达1 600人次,每天的集体剂量约为2~30人·mSv,核电厂集体剂量主要来自机组换料大修^[30],所以在大修期间必须要严格控制作业时间,最大限度保证作业人员安全。借助于虚拟现实技术将监测的辐射剂量分析结果附加到数字孪生系统中,为作业人员提供友好的交互式体验、路径合理规划、

大修方案进行事先推演,可减少现场停留时间和作业差错。某核电运营公司针对核岛静止主设备检修需求,基于稳压器、反应堆、蒸汽发生器等核岛关键设备三维模型开发了可视化设备管理系统与检修工艺管理系统(如图6所示),对检修流程进行模拟仿真,实现检修过程方案推演和验证^[31],减少了作业人员的作业时间和职业照射剂量。

4 数字孪生在核电设备领域应用面临的问题

数字孪生作为新兴技术,发展还处于起步阶段,无疑会面临诸多问题和挑战,主要表现在如下方面:(1)数字孪生技术标准体系尚不成熟,业界对于数字孪生体系架构内尚未达成共识,核电设备作为特殊行业,其应用场景与其它行业表现出较大的差异性,适用于核电设备的数字孪生完整体系尚未建立,需要进一步深入研究和完善;(2)在现有技术条件下,模型在异构软件之间的转换技术尚存在技术短板,模型在转换过程中不能确保其数据完整性,在一定程度上限制了数字孪生模型应用范围;(3)总承包方需要与下游数百家设备制造商进行数据交互,但在现有核电设备产业链供应链生态关系较为松散的模式

下,受相互信任关系影响,信息系统无法实现紧密集成,数据耦合程度较低,因此需要打通数据壁垒,构建更加高效的产业链协作平台;(4)核电厂对信息系统安全可靠要求极高,同时核电仿真计算软件只有经过V&V(Validation and Verification)有效验证,才能应用于核电设备的设计,所以需要制定更加严格的安全保障体系,以及有效的软件验证标准来充分保证数字孪生系统的安全性和数据的准确性。

5 结束语

虽然目前数字孪生应用面临种种困难,但这不妨碍将数字孪生与核电设备设计、制造和运维等阶段数字化转型和升级相结合,着力推进核能行业共性关键技术突破,提高整个核电设备相关产业的核心技术能力。只有通过不断地研究与实践,积极应对数字孪生发展中所遇到的各种问题和挑战,才能促进数字孪生理论和技术体系的不断完善,形成自主化关键技术,从而进一步推进数字孪生平台建设。

参考文献:

- [1] 中国信通院,工业互联网产业联盟.工业数字孪生白皮书(2021)[EB/OL].[2021-11-30].<http://www.aii-alliance.org/uploads/1/20211206/0abb4304b8de47a3c04ce803a5ac5dc8.pdf>.
- [2] Roland Rosen,Georg von Wichert,Georg Lo,et al.About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing[J].IFAC-Papers OnLine,2015,48(3):567-572.
- [3] (美)迈克尔·格里夫斯.产品生命周期管理[M].褚学宁,译.北京:中国财政经济出版社,2007:67-72.
- [4] 伍全.关于加快推进国有企业数字化转型工作的通知[EB/OL].[2020-09-21].<http://www.sasac.gov.cn/n2588020/n2588072/n2591148/n2591150/c15517908/content.Html>.
- [5] 陶飞,刘蔚然,刘检华,等.数字孪生及应用探索[J].计算机集成制造系统,2018,24(1):1-18.
- [6] 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):753-767.
- [7] 刘大同,郭凯,王本宽,等.数字孪生技术综述与展望[J].仪器仪表学报,2018,39(11):1-10.
- [8] 中国政府网.中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL].[2021-09-22].http://www.gov.cn/xinwen/2021-10/24/content_5644613.htm.
- [9] 中共中央宣传部,中央国家安全委员会办公室.总体国家安全观学习纲要[M].北京:学习出版社,人民出版社,2022:120.
- [10] 工业和信息化部,财政部,商务部,国务院国有资产监督管理委员会,国家市场监督管理总局.关于印发加快电力装备绿色低碳创新发展行动计划的通知[EB/OL].[2022-08-24].https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2022/art_4ccb89465cc4336b88b19a02bbf473b.html.
- [11] 刘亚东,陈思,丛子涵,等.电力装备行业数字孪生关键技术与应用展望[J].高电压技术,2021,47(5):1539-1554.
- [12] 熊明兰,王华伟.基于数字孪生的民机运行安全框架体系设计[J].计算机集成制造系统,2022,28(8):2291-2301.
- [13] 王尚刚,程江峰,高顺利,等.数字孪生智慧燃气系统:概念、架构与应用[J].计算机集成制造系统,2022,28(8):2302-2317.
- [14] Bowman D,Dwyer L,Levers A,et al.A Unified Approach to Digital Twin Architecture-Proof-of-Concept Activity in the Nuclear Sector[J].IEEE Access,2022(10):44691-44709.
- [15] Kochunas B,Huan X.Digital twin concepts with uncertainty for nuclear power applications[J].Energies,2021,14(14):4235.
- [16] Arzhaev A,Arzhaev A,Makhanev V,et al.NPP Unit Life Management based on Digital Twin Application[C]//E3S Web of Conferences.EDP Sciences,2020(209):03006.
- [17] 胡梦岩,孔繁丽,余大利,等.数字孪生在先进核能领域中的关键技术与应用前瞻[J].电网技术,2021,45(7):2514-2522.
- [18] 田锋,段海波,杨振亚,等.数字孪生体技术白皮书[EB/OL].安世亚太公司数字孪生体实验室,[2019.12].http://net.Bangong.cn:6003/upload/contents/2019/12/20191230095610_31637.pdf.
- [19] 陶飞,张贺,戚庆林,等.数字孪生十问:分析与思考[J].计算机集成制造系统,2020,26(1):1-16.
- [20] 王鸿庆,杨雨辰,林雪萍.Digital Twin数字孪生-工四100术语[EB/OL].知识自动化,[2016-05-19].<https://mp.weixin.qq.com/s/98xLVNpEC4i8WM7HakCSpA>.
- [21] 杨帆,吴涛,廖瑞金,等.数字孪生在电力装备领域中的应用与实现方法[J].高电压技术,2021,47(5):1505-1521.
- [22] 谭磊,赵建光.金属3D打印技术核电领域研究现状及应用前景分析[J].电焊机,2019,49(4):339-343.
- [23] 高士根,周敏,郑伟,等.基于数字孪生的高端装备智能运维研究现状与展望[J].计算机集成制造系统,2022,28(7):1953-1965.
- [24] 金晓航,泮恒拓,许壮伟,等.基于SCADA数据和单分类简化核极限学习机的风电机组发电机状态监测[J].计算机集成制造系统,2022,28(8):2408-2418.
- [25] 刘惠,刘振宇,郑维强,等.深度学习在装备剩余使用寿命预测技术中的研究现状与挑战[J].计算机集成制造系统,2021,27(1):34-52.
- [26] 刘丽,裴行智,雷雪梅.基于时间卷积注意力网络的剩余寿命预测方法[J].计算机集成制造系统,2022,28(8):2375-2386.
- [27] 刘文溢,刘勤明,周林森.基于高阶隐马尔科夫模型的设备剩余寿命预测[J].计算机集成制造系统,2022,28(8):2387-2398.
- [28] 许勇,蔡云泽,宋林.基于数据驱动的核电设备状态评估研究综述[J].上海交通大学学报,2022,56(3):267-278.
- [29] 卢六平.核电站换料大修工期分析和进度管理方法[J].项目管理技术,2008,6(6):45-50.
- [30] 徐明华,金卫阳,戴生迁,等.福清核电2014-2018年职业照射剂量分析[J].辐射防护通讯,2019,39(4):1-4.
- [31] 陈钢,姜胜耀,胡四光.基于三维模型的核电厂4D大修信息化平台技术研究[J].核动力工程,2017,38(3):180-184.

作者简介:景晓冬(1974-),男,本科,高级工程师,研究方向:核电设备智能化设计技术研究与应用。