

数字孪生: 跨界赋能于多领域智能的新应用^①



刘芳¹, 刘琪², 黄美晨¹, 常丽娟¹, 王晓晖¹, 赵玲¹, 田枫¹

¹(东北石油大学 计算机与信息技术学院, 大庆 163318)

²(东北石油大学 电气信息与工程学院, 大庆 163318)

通信作者: 黄美晨, E-mail: 228002070385@stu.nepu.edu.cn

摘要: 随着大数据、5G、人工智能、CPS、云计算、物联网技术的发展与交叉融合, 使得世界朝着数字化、智能化方向发展. 数字孪生是以物理实体为原型建立多维虚拟模型, 通过安装在物理本体上的传感器实时反馈数据, 并结合以往的历史数据和人工智能技术, 最后利用软件分析并呈现. 由于数字孪生技术能与多个先进理念, 如: 工业4.0、航空航天、智慧城市、智慧医疗等良好的融合并应用, 这使其成为多个行业的热门研究方向与主要驱动技术, 在各行各业都有很大的发展空间. 本文首先阐述了数字孪生技术的基本概念, 梳理了数字孪生技术的发展脉络, 进一步理清了数字孪生技术与CPS技术之间的关系, 并介绍了数字孪生技术的研究现状. 其次, 介绍了数字孪生的关键技术即多维多尺度建模, 孪生数据管理和虚拟呈现. 最后, 探讨了数字孪生技术在智慧工厂领域、智慧城市领域、孪生医疗领域、航空航天领域的应用发展和方向, 并从方案、特点、关键技术等角度介绍了本研究团队在智慧工厂领域对原稳加热炉设备的数字孪生应用案例.

关键词: 数字孪生; 虚拟呈现; 多维多尺度建模; 智慧工厂; 智慧城市

引用格式: 刘芳, 刘琪, 黄美晨, 常丽娟, 王晓晖, 赵玲, 田枫. 数字孪生: 跨界赋能于多领域智能的新应用. 计算机系统应用, 2023, 32(8): 31-41. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/9191.html>

Digital Twin: New Application of Transboundary Empowerment to Industrial Intelligence

LIU Fang¹, LIU Qi², HUANG Mei-Chen¹, CHANG LI-Juan¹, WANG Xiao-Hui¹, ZHAO Ling¹, TIAN Feng¹

¹(School of Computer & Information Technology, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

²(School of Electrical & Information Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: With the development and cross-integration of big data, 5G, artificial intelligence, CPS, cloud computing, and Internet of Things technologies, the world is developing in the direction of digitization and intelligence. Digital twin is to build a multidimensional virtual model based on the physical entity. The sensor installed on the physical entity feeds back the data in real time, combines the previous historical data and artificial intelligence technology, and finally analyzes and presents them with software. Because digital twin technology can be well integrated with and applied in many advanced concepts, such as industry 4.0, aerospace, smart city, and smart medical, it has become a popular research direction and main driving technology in many industries and has great development space in all walks of life. This study firstly expounds on the basic concept of digital twin technology, sorts out the development of digital twin technology, further clarifies the relationship between digital twin technology and CPS technology, and introduces the research status of digital twin technology. Secondly, it introduces the key technologies of the digital twin, namely multidimensional and multi-scale modeling, twin data management, and virtual presentation. Finally, the application and development direction of digital

① 基金项目: 国家自然科学基金 (61502094); 黑龙江省省属本科高校基本科研业务费 (东北石油大学优秀中青年科研创新团队) (KYCXTD201903); 黑龙江省高等教育教学改革研究项目 (SIGY20190098); 黑龙江省哲学社会科学基金 (22EDE389); 黑龙江省教育科学规划重点课题 (GJB142113); 黑龙江省省属本科高校基本科研业务费 (东北石油大学引导性创新基金)(2020YDL-11)

收稿时间: 2022-11-17; 修改时间: 2023-01-19; 采用时间: 2023-03-14; csa 在线出版时间: 2023-06-30

CNKI 网络首发时间: 2023-07-03

twin technology in smart factory, smart city, twin medical, and aerospace fields are discussed, and the digital twin application cases of the original stable heating furnace equipment conducted in the smart factory field by the research team in this study are introduced from the perspectives of scheme, characteristics, and key technologies.

Key words: digital twin; virtual presentation; multidimensional multi-scale modeling; smart factory; smart city

随着新一代信息技术和通信技术的快速发展,世界朝着数字化、智能化方向发展.在智慧工厂、智慧城市、航天航空和生物医药等领域,有许多高度集成化的复杂设备如飞机、智能机床、火箭卫星、医疗设备等.这些设备的设计、研制、测试、运营、维护等全生命周期长,发生故障和性能退化概率增加,因此,针对复杂设备的故障检测和状态检测广受关注.数字孪生技术的出现缩短了设备的全生命周期,同时,实时检测设备状态,进行故障诊断,保证设备安全运行.美国国家航天局和空军实验室一起提出未来飞行器的数字孪生范例^[1],这个数字孪生体是由多物理场、多尺度、多概念的高保真物理模型、飞行器历史数据以及传感器实时数据构成的虚拟模型,来完成飞行器的健康状况检测、任务可行性预测和剩余寿命估测.数字孪生技术已迅速成为了学术界和企业工作者的研究热点,各国也在大力推进制造业智能化转型.

本文首先介绍了数字孪生的基本概念;其次介绍了CPS,数字孪生与CPS的关系,相同点与不同点;然后阐述了数字孪生的发展历程与研究现状;接下来介绍了数字孪生实现的关键技术,包括多维多尺度建模,孪生数据管理与虚拟呈现;然后阐述了数字孪生分别在智慧工厂领域、智慧城市领域、孪生医疗领域、航空航天领域的发展和方向,并从方案、特点、关键技术等角度介绍了本研究团队在智慧工厂领域对原稳加热炉设备的数字孪生应用案例.

1 数字孪生定义与现状

1.1 基本概念

数字孪生又称为数字双胞胎,是指物理实体一对一映射到数字空间的动态虚拟模型,通过信息化平台监控物理实体的运行状态、诊断其健康状态、模拟其变化过程、预测其剩余使用寿命等,以数字化模型来模拟物理实体在现实世界的状态和行为,并且可以通过预定义接口发出指令调整物理实体的行为.

数字孪生的物理实体可以是多层次的,物理实体

主要分为单元级、系统级和复杂系统级.例如零部件看作单元级,由零部件组合成发动机控制系统的系统级,再由各系统组成航天器系统为复杂系统级,实现各系统间协作运行,再数字化,建立数字孪生模型.

数字孪生的建立来自于物理本体的多维虚拟模型.数字孪生在建模方面,主要关注物理实体的物理行为、材料测定、量化误差研究,使模型参数更加准确.数字孪生数据反馈也是多要素的,依赖于压力、温度、角度、速度等传感器.数字孪生利用人工智能技术,以传感器反馈数据和大量历史数据为材料,不断迭代优化模型,实现多空间尺度的模型构建.

CPS是一个综合计算、网络和物理环境的多维复杂系统,通过3C (computation、communication、control)技术的有机融合与深度协作,实现大型工程系统的实时感知、动态控制和信息服务^[2].数字孪生是CPS^[3]继续发展而诞生的,它也是CPS技术发展进程中所需要的条件^[4].CPS集成了计算、存储和通信功能,也能实时高效的监测和控制物理实体对象.CPS的基本构成:智能连接、数据分析、网络连接、认知与决策、执行^[5].CPS系统同样由物理实体上的传感器采集数据;数据分析将所采集数据转化为能理解的信息;网络是CPS运行的核心,通过网络连接汇聚各个线路信息;认知与决策利用已有经验和人工智能学习结果做出正确处理方案;执行是通过执行层实现虚拟模型到物理实体的反馈控制.

虽然两者都强调物理实体、虚拟系统以及虚实之间的交互,但数字孪生更关注物理实体和虚拟模型的实时运行映射,而CPS则更关注系统的信息采集、处理和反馈控制.CPS系统可视为数字孪生的更高层级,而数字孪生可看作CPS系统构成的一部分.

1.2 研究现状

2003年,由Grieves教授提出“镜像空间模型”,这一模型没有引起充分关注.后来2005年Grieves教授提出数字孪生概念,它是包括了虚拟模型、物理实体和两者之间连接的三维模型,此模型能实现物理产品

的数字化表达,实现产品全生命周期数据的有效管理^[6,7]. 2010年,美国国家航天局(NASA)利用数字孪生概念对飞行系统进行全面诊断和预测,来保证飞行系统的安全操作.范德堡大学的Li等人^[8]提出了面向机翼健康监测数字孪生的动态贝叶斯网络,以预测裂纹增长的概率.2015年,西门子公司^[9]将数字孪生技术由复杂高端的飞行器军事领域推广到一般工业制造领域,以提高机器生产的质量和效率.美国通用电气公司基于自己的云平台Predix构建数字孪生体,来实现对发动机的实时监控、及时检查和预测性维护^[10].国内对于数字孪生的研究起步较晚,多以高校为主.北京航空航天大学的陶飞等人^[11]在2017年提出了数字孪生车间的概念,探讨了车间信息世界和物理世界的链接,并系统阐述了数字孪生车间的基本组成和运行原理^[11].2018年陶飞等人提出数字孪生驱动的6条应用准则和14类应用,引导学者们进一步思考如何将数字孪生理论落地^[12].此外,如图1所示,为陶飞等人2019年提出的数字孪生五维概念模型^[13],将数字孪生应用分为物理实体、虚拟实体、服务、孪生数据、连接这5个维度,为数字孪生模型在10大领域的落地方案提供参考.数字孪生技术发展脉络,如图2所示.在此期间,庄存波等人^[2]提出数字孪生技术有助于解决产品全生命周期中数据管理问题,建立了产品数字孪生体的体系结

构,并结合产品生产的各个实施阶段提出了产品数字孪生体的概念.丁华等人^[14]将深度学习应用到数字孪生领域,基于高逼真度的孪生仿真模型,实现采煤机在线可视化,完成采煤机健康状态检测和关键零件剩余寿命预测.武颖等人^[15]为了解决复杂产品装配的时效性、预测性差等问题,构建由物理车间、虚拟车间和车间生产管理系统三者协同工作的孪生模型,同时结合Markov方法,实现装配过程质量数据的采集、分析、反馈以及预测,通过搭建质量管控平台,以实例验证了其准确性.本文对数字孪生发展过程中的重要文献进行调研并梳理如表1所示.

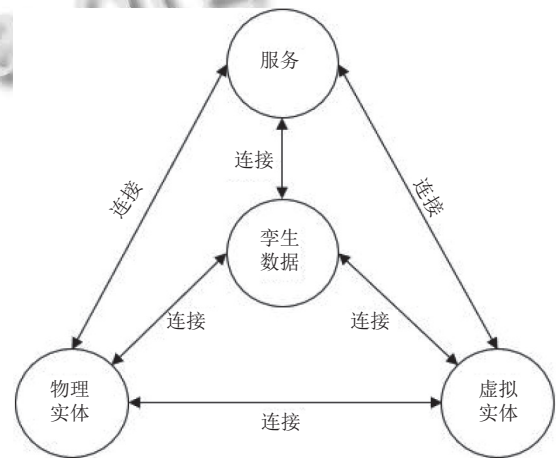


图1 数字孪生五维概念模型

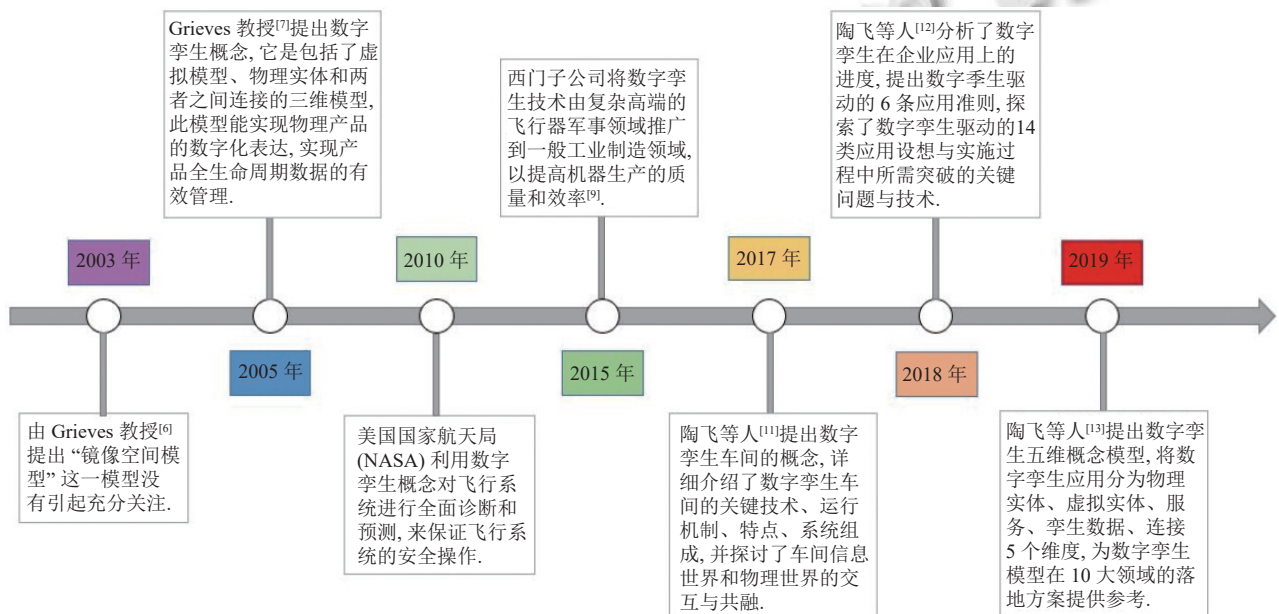


图2 数字孪生发展脉络

表1 数字孪生技术发展过程中的重要文献

序号	时间	作者	文献名称	研究内容
1	2003年	Grievess ^[6]	Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises	提出“镜像空间模型”
2	2005年	Grievess ^[7]	Product lifecycle management—Driving the next generation of lean thinking	提出数字孪生概念
3	2014年	Li等人 ^[8]	A dynamic Bayesian network approach for digital twin	提出了面向机翼健康监测数字孪生的动态贝叶斯网络
4	2015年	西门子公司 ^[9]	西门子推出MindSphere开放工业云	将数字孪生技术由复杂高端的飞行器军事领域推广到一般工业制造领域
5	2015年	何江 ^[10]	工业互联网架构实例分析——以GE公司Predix为例	基于云平台Predix构建数字孪生体, 来实现对发动机的实时监控、及时检查和预测性维护
6	2017年	陶飞等人 ^[11]	数字孪生车间——一种未来车间运行新模式	北京航空航天大学陶飞等人在2017年提出了数字孪生车间的概念, 探讨了车间信息世界和物理世界的链接, 并系统阐述了数字孪生车间的基本组成和运行原理
7	2017年	庄存波等人 ^[2]	产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势	提出数字孪生技术有助于解决产品全生命周期中数据管理问题, 建立了产品数字孪生体的体系结构, 并结合产品生产的各个实施阶段提出了产品数字孪生体的概念
8	2018年	陶飞等人 ^[12]	数字孪生及其应用探索	提出数字孪生驱动的6条应用准则和14类应用, 引导学者们进一步思考如何将数字孪生理论落地
9	2019年	陶飞等人 ^[13]	数字孪生五维模型及十大领域应用	提出数字孪生五维概念模型
10	2019年	武颖等人 ^[15]	基于数字孪生技术的复杂产品装配过程质量管控方法	构建由实体车间、仿真车间和车间生产管理系统三者协同工作的孪生车间模型, 同时结合Markov方法, 实现装配过程质量数据的采集、分析、反馈以及预测
11	2020年	丁华等人 ^[14]	数字孪生与深度学习融合驱动的采煤机健康状态预测	将深度学习应用到数字孪生领域, 基于高逼真度的孪生仿真模型, 实现采煤机在线可视化, 完成采煤机健康状态检测 and 关键零件剩余寿命预测

2 数字孪生关键技术

2.1 多维多尺度建模

数字孪生应用的首要步骤就是要创建数字孪生模型。Grievess 教授最先提出一种数字孪生模型, 即包括仿真、实体、连接的三维模型^[6], 此虚拟模型能实现物理产品的数字化表达。但随着数字孪生技术逐步由航天飞行器领域走向各个民用行业, 而各个行业对于数字孪生的应用对象和业务诉求不同, 创建数字孪生模型遇到了很大的挑战。此外, 传统成熟建模技术主要关注物理实体的几何和物理维度, 缺少从深层次的行为、机理、规则层面进行融合设计, 而且缺少从不同时间尺度和不同空间尺度来刻画物理实体的功能。

数字孪生建模要实现多维多尺度的高保真建模, 多维多尺度建模可看作从空间维、时间维、质量维等多维度来刻画物理实体的几何、属性、行为等特征。多尺度建模包括从不同空间尺度来数字化物理实体, 从3D空间、不同层级(单元级、系统级、复杂系统级)来模拟物理实体, 以及从时间尺度刻画物理实体的复现推演、实时动态、未来预测过程。

构建多维多尺度模型, 是数字孪生技术发展的趋势。陶飞等人提出数字孪生五维模型满足动态多维多尺度模型的要求, 将数字孪生应用分为物理实体、虚拟实体、服务、孪生数据、连接这5个维度^[13], 其中虚拟实体就包括几何模型、物理模型、行为模型和规则模型, 从多维多尺度对物理实体进行刻画, 使建模出的虚拟模型与物理实体保持高度一致性和准确性。

张超等人^[16]提出了数字孪生的多维多尺度智能空间模型。多维多尺度智能空间模型从物理空间、数据空间、虚拟空间和知识空间这4个维度实现了智能空间模型。其中虚拟空间通过历史数据和实时数据刻画出多领域、多尺度、高保真的孪生模型, 分为几何建模、机理建模、数据建模和模型融合与可视化这4个方面, 为数字孪生系统决策、控制提供载体, 保证数据指令的上传下达。

2.2 孪生数据管理

孪生数据管理包括数据采集、传输、处理、存储、计算一系列步骤, 是数字孪生技术的关键部分。孪生数据来源于物理对象的全生命周期。随着物理实体

的变化,收集、存储、处理其从诞生开始到废弃结束的全部数据,来加强物理实体和虚拟模型之间的交互以及迭代优化。

数据采集是数字孪生技术落地应用的基础。数据采集需要依靠各类型的高精度传感器、物理对象的控制中心以及历史数据,来刻画目标系统的实时运行状态、健康状况和剩余寿命预测,并且需要分布足够的数量和各种类型的高精度传感器,构建传感器网络。例如,采煤机数据采集主要包括关键零件上的各种传感器,采煤机的牵引部、截割部、辅助装置等实时工况数据,历史维修记录数据^[17]。目前传感器朝着高集成度、高可靠性、低成本方向发展,但传感器的精度受到一定限制,稳定性不强、对工作环境比较挑剔,发展高精度传感器成为研究热点。

孪生系统的数据传输要注重实时性和安全性,所以要搭建一个高速、低时延的信息传输网络,将各类信息快速安全传输到孪生数据库。因此,数字孪生技术对物理传输线路、网络接口、传输协议等要求严格。目前通信技术快速发展和5G的出现,大大推动了数字孪生数据实时传输的发展。

孪生数据需要强大的云平台服务器来进行分布式管理,就采煤机的数据预处理转换成统一数据格式和单位^[17],主要步骤分为:①数据清理,目的是删除重复信息,减少冗余,同时能纠正一些错误,提高数据的可靠性。②数据变换,目的是统一数据量纲,使数据更加规整。③数据归约,目的是对数据进行压缩,减少计算量。数据处理需要实时可靠的强大处理能力,目前构建私有云服务数据中心为可行解决方案。

孪生数据需要高性能计算,注重准确性和实时性两项指标。数据高性能计算需要依靠高算力平台,基于分布式计算的云服务平台往往是最优选择。云计算平台能优化数据结构、改进算法以及具有强大的计算能力,是系统实时性的重要保障^[18]。云计算平台集成强大的硬件、软件、网络等,需要巨大物力财力,数字孪生技术许多民用场景下可以使用公有云^[19]。以用户身份访问云计算平台,来完成孪生系统所需要的高性能计算服务。用户无需关心云计算实现方式,大大提高数字孪生系统搭建与运行效率。除了云计算,边缘计算也在数字孪生数据处理时广泛应用。边缘计算是将各类本来要上传到云端计算配置到用户端,也就是计算可在手机、智能家居、摄像头等靠近数据源的终端上完

成,减少终端到云服务器之间的传输。边缘计算降低计算时延的同时,也提高其安全性。李浩等人^[20]提出工业数字孪生系统(iDTS)概念,其中有基于“云-端”的iDTS运行模式和基于“云-边-端”的iDTS运行模式。基于“云-端”的iDTS运行模式以云计算平台为中心,实时处理对应的孪生数据,该模式下成本低,可靠性高。基于“云-边-端”的iDTS运行模式集成云计算核心和边缘计算的能力,在“云-端”的iDTS模式基础上增加边缘计算能力,具有低时延、安全性高等特点。

2.3 虚拟呈现

虚拟现实技术(virtual reality, VR)通过输出设备,使人从视觉、听觉、触觉各方面沉浸式体验虚拟环境。虚拟现实涉及计算机图形学、传感技术、仿真技术、人工智能等多个交叉领域^[21]。VR将物理实体以超现实形式呈现,特别应用在一些高危险性、高难度操作环境下,实现人机互动,为训练人员提供安全的训练环境。VR技术依赖于外部多维输入信息,结合相应融合算法,产生可视化虚拟环境,使人能迅速直观的了解数字孪生系统的各子系统的构成、特点以及运行原理,在数字孪生系统的实时检测、健康诊断、维修评估方面发挥作用。

增强现实技术(augmented reality, AR)是虚拟现实技术的进一步发展。AR技术需要依赖摄像头、传感器、实时计算将虚拟世界信息和真实世界信息融合起来呈现给用户。增强现实3大特征:虚实融合、实时交互、三维注册^[22]。AR技术将虚拟信息叠加到真实的世界,被人的感官所感知,达到超越现实的感官体验^[23]。AR技术创建的场景通常由虚拟呈现和真实环境组成,因而沉浸感更加纯粹。

混合现实技术(mix reality, MR)将VR技术和AR技术进行融合升级,结合二者的优势,将虚拟世界和真实世界合并创造新的可视化环境^[24]。AR技术把虚拟信息简单叠加在真实环境中,与之不同的是,MR技术将真实物体融入虚拟环境,用户可以在这一可视化环境中与各类真实或虚拟对象进行交流互动。用户、真实世界和虚拟空间之间的交互得到实现,MR技术为用户提供更好的参与感和沉浸感。

虚拟呈现技术广泛应用于游戏、娱乐领域,其发展前景开阔,VR、AR、MR技术发展快速,朝着多感官、微型化、移动化方向发展。但应用到许多其他领

域要求虚拟呈现效果要高度准确,所以外部输入信息要实时准确,就需要依赖于大量的高精度传感器.VR技术不具备自主获得信息能力,AR、MR将虚拟信息叠加到真实世界提供交互体验的难题也需进一步研究,并且VR、AR、MR技术本身的实时计算和融合匹配瓶颈也需要进一步发展.虚拟呈现是构建数字孪生系统最后一个环节,VR、AR、MR等先进的虚拟现实技术也必将在数字孪生领域广泛应用.

3 数字孪生在行业中的应用

数字孪生可以与多个领域良好融合,为其智能化赋予能量.目前,数字孪生技术已经在很多行业得到了应用,除了最早起源的航空航天领域,其中工业4.0、智慧城市、孪生医学等领域的应用较为广泛,成为了众多科技企业关注的焦点,以下将介绍其在智慧工厂、智慧城市、孪生医疗以及航空航天领域的应用发展,如图3所示.

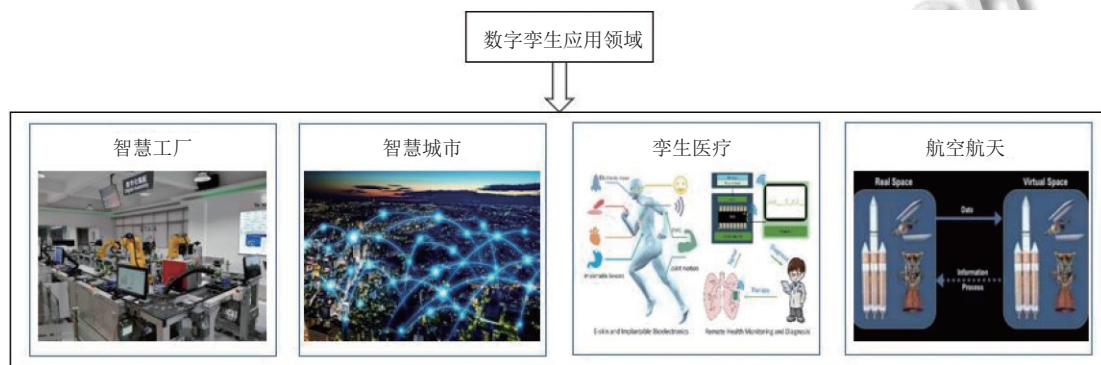


图3 数字孪生应用领域图

3.1 智慧工厂领域

数字孪生技术在智能制造为主的工业领域兴起,如“互联网+制造”“工业4.0”和“中国制造2025”等智能制造发展战略.在智能工厂领域,数字孪生利用传感器采集数据、运行历史数据,以完成数字化映射物理实体的全生命周期^[3].数字孪生技术广泛应用于智能工厂产品的设计^[25,26]、运维^[27-30]、增材制造、服务、报废等环节.

Farid^[31]提出基于数字孪生的自动流水线个性化设计.Aivaliotis等人^[32]提出了基于数字孪生的机械设备剩余使用寿命预测,目的是对制造设备进行预测性维护.陶飞等人提出了数字孪生车间的概念^[11],并首次提出了数字孪生五维模型^[12].Bao等人^[33]提出面向制造的数字孪生建模和操作方法.李浩等人^[20]针对整个工业领域的数字孪生系统的概念、系统构成、逻辑框架以及运行模式,首次提出工业数字孪生系统(iDTS)概念,继而提出四阶段成熟度模型,最后分析了4种iDTS运行模式.江海凡等人^[34]提出数字孪生演进模型(DTEM)的概念,该模型由基本模型、关联关系、演进过程和融合过程4个部分组成,探讨了DTEM在智能装备、智能生产和智能运维中的典型应用.

Zhang等人^[35]以数字孪生车间为对象,提出了一种三维可视化交互系统六维模型,并以叶片转子试验车间为模型实例,表明该数字孪生车间系统的数据驱动的高效性和实时性.杜莹莹等人^[36]为解决工业机器人的可视化实时监控以及物理系统交互问题,参考陶飞等人的五维模型^[13],提出的数字孪生监控系统,该系统分为物理层、传输层、虚拟层和应用层这4个层级,利用Unity3D搭建虚拟场景,实现了对工业机器人进行可视化实时监控,经开发三维可视化监控系统进行验证,该系统具备较好的实时性、交互性和可行性.李彦瑞等人^[37]描述了流程工业抽象模型与数字孪生理论模型之间的关系,分析了将数字孪生应用到流程工业中解决瓶颈的关键技术,并以一条实例生产线进行验证,表明数字孪生技术在实际工业中的应用的可行性.

3.2 智慧城市领域

随着BIM技术、物联网、人工智能、5G技术的发展,数字孪生城市也成为研究应用热点,城市建设朝着智能化方向转变.基于数字孪生技术的智慧城市主要具有精准映射、虚实交互、软件定义、智能干预这4个特征.利用城市信息模型技术、大量摄像头实时监控和历史数据分析,实现交通疏导、工程项目

管理、外来人口登记、基础设施管理、警力消防调度等功能。

刘占省等人^[38]提出了一种基于数字孪生在公共场所消防疏散动态引导方法。Niu 等人^[39]提出工程智能化概念,提出工程的目标和构成,分析了智能建造与传统建造的异同。樊启祥等人^[40]论述了智能建造的定义和特征,结合以往的智能建造实践,提出了优化闭环控制理论。刘占省等人^[41]以数字孪生五维模型为基础,结合建造具体施工过程,提出智能建造多维模型。潘巧燕^[42]以福州滨海新城规建管建设为例,建设大数据平台,实现规、建、管统筹协调和资源共享,逐步形成与实体城市的数字城市体。周瑜等人^[43]就雄安新区提出建设“数字孪生城市”的概念框架,提出基于数字孪生的实体城市与数字城市相互映射、协同交互的复杂系统,达到防控城市问题、高效管理城市的效果。毛子骏等人^[44]针对新冠疫情防控暴露出我国城市治理的诸多短板,阐述了城市“全周期管理”和数字孪生城市的基本概念及特征,并将二者之间内在逻辑与实现路径进行关联,数字孪生赋能“全周期管理”,实现城市治理的高效运行和城市资源的灵活调用。李林等人^[45]分析了传统的 GIS+BIM 的模型缺点,提出了基于北斗网格码的时空编码的开放性大数据架构,支撑数字孪生城市信息模型(CIM)。建模过程包括时空网格编码、网格关联数据、网格数据加载、数据驱动模型这4个步骤。时空网格框架对于 CIM 有重要的赋能价值,但基于时空网格框架的 CIM 建模在实际应用中有认知和技术层面难题未解决。毛超等人^[46]提出一种城市智慧治理的体系,该体系嵌套 DIKW 模型,结合具有数字孪生技术特征的城市隐秩序显性化原理,结合“数字孪生-重庆”案例,阐明数字孪生驱动下的智慧城市治理的逻辑、架构及体系。

目前智慧城市理论发展趋于成熟和稳定,而中国雄安新区、福州滨海新城等都在试点建设智慧城市,但是智慧城市发展仍面临许多问题,比如没有统筹全局的顶层设计,各部门独立建设,难以形成一个整体,以及智慧新区建立后,城市管理体系松散,运营能力薄弱等问题。未来的智慧城市研究具有广阔的前景。

3.3 孪生医疗领域

将数字孪生技术应用到医疗领域,能有效预防疾病、提高临床诊断水平、降低手术风险,大大提高医疗服务的效率与质量。通过穿戴式传感器、新型医疗检测、历史病历、静态人体数据采集,建模出多维多

尺度的高保真虚拟人体。医护人员可以获取人体多源数据,更准确地判断人体患病概率,而且可以进行手术虚拟验证以及提供个性化医疗保健等服务。

侯增广等人^[47]提出数字孪生技术将会是医疗领域发展的一个有效切入点。陶飞等人^[13]提出基于数字孪生医疗领域五维模型,分别是生物人体、虚拟人体、孪生数据、医疗服务健康和实时数据连接。Korshoej 等人^[48]提出了 TTFields 治疗胶质母细胞瘤的新临床方法,以骨骼组织工程为实例,介绍了数字孪生技术在再生医学方面的发展。Naplekov 等人^[49]提出了人冠状动脉血管系统的数值建模方法,主要以获得血流动力学和剪切应力,来创建冠状动脉血管的数字孪生体。瑞典数字孪生协会(SDTC)发表了基于数字孪生实现“智慧医疗”的设想^[50]。Croatti 等人^[51]研究了数字孪生与智能体和多代理系统(MAS)技术在医疗保健中的集成,基于数据驱动的人工智能方法构建阿尔茨海默病(AD)疾病模型,并经过数字孪生体在严重创伤管理中案例研究,实现数字孪生技术在医疗领域落地应用。胡天亮等人^[52]提出了数字孪生诊疗系统的概念,将患者状态数据、疾病原理模型和智能诊断相结合建立数字孪生诊疗系统,探讨了在临床诊疗、基础医学研究、教育培训、医疗设备研发等领域的应用。数字孪生技术在医疗领域还处于起步阶段,未来有很大的发展潜力。

3.4 航空航天领域

数字孪生技术最早就应用在军事航天领域,航空航天系统具有研发难度大、制造技术复杂、产品型号多、产品价值高、制造数量少、试错成本高昂等特点。美国空军实验室(AFRL)和美国国家航天局(NASA)一起提出未来飞行器的数字孪生范例,这是一种集成的、多物理、多尺度的概率仿真模型,能够利用物理实体通过传感器采集数据来反映与该模型对应的实体的状态,主要对飞行系统进行全面诊断和预测任务,以进行可行性预测和剩余寿命估测^[7]。

王焱等人^[53]针对航空产品制造需求,提出了模块化智能单元体模型,给出了智能生产系统的构建方法及关键技术,为航空工业智能制造的落地应用提供参考。崔一辉等人^[54]论述了数字孪生技术在航空发动机产品设计、验证、制造和保障环节的应用,并对基于数字孪生技术的智能生产线实现途径进行验证。黄俊波等人^[55]结合质量管理体系标准,进行基于数字孪生技术的直升机装备落地应用探索。张素明等人^[56]提出

建立运载火箭测试与发射阶段数字孪生模型,利用火箭实体和孪生火箭的交互,实现火箭飞行过程数据分析、协同诊断和故障处理等功能.吴浩等人^[57]提出了基于数字孪生的火箭结构设计制造与验证技术,较之以前增加了虚拟映射、模型驱动和数字管理等要素,缩短运载火箭的全生命周期.熊明兰等人^[58]提出基于数字孪生的民机运行安全系统体系架构,研究了该架构的民机子系统、民机维修、民机运行环境及人员的建模方式、数据采集和实时映射.郝博等人^[59]提出基于数字孪生的装配过程质量控制方法,该方法基于Copula函数构建数字孪生车间.张文杰等人^[60]结合数字孪生技术,提出基于多智能体的智能试验体系架构

设计,推动了航天器试验模式由物理为主导转向物理与虚拟融合,以实例证明该方法的可行性.刘震磊等人^[61]开发了基于数字孪生技术的飞机结构件准确度检测平台,为数字孪生技术应用在航空制造业领域提供了新模式与新方法.

3.5 数字孪生在智慧工厂中的应用实例

本研究团队针对数字孪生工业方面的应用,为使在岗工人可以更加直观地掌握原稳加热炉状态,构造了加热炉三维模型,再现真实的加热炉内部运行环境,直观地对加热炉各参数进行立体显示,使得操作人员可以针对参数变化进行操作,更加安全便捷,数字孪生加热炉框架如图4所示.

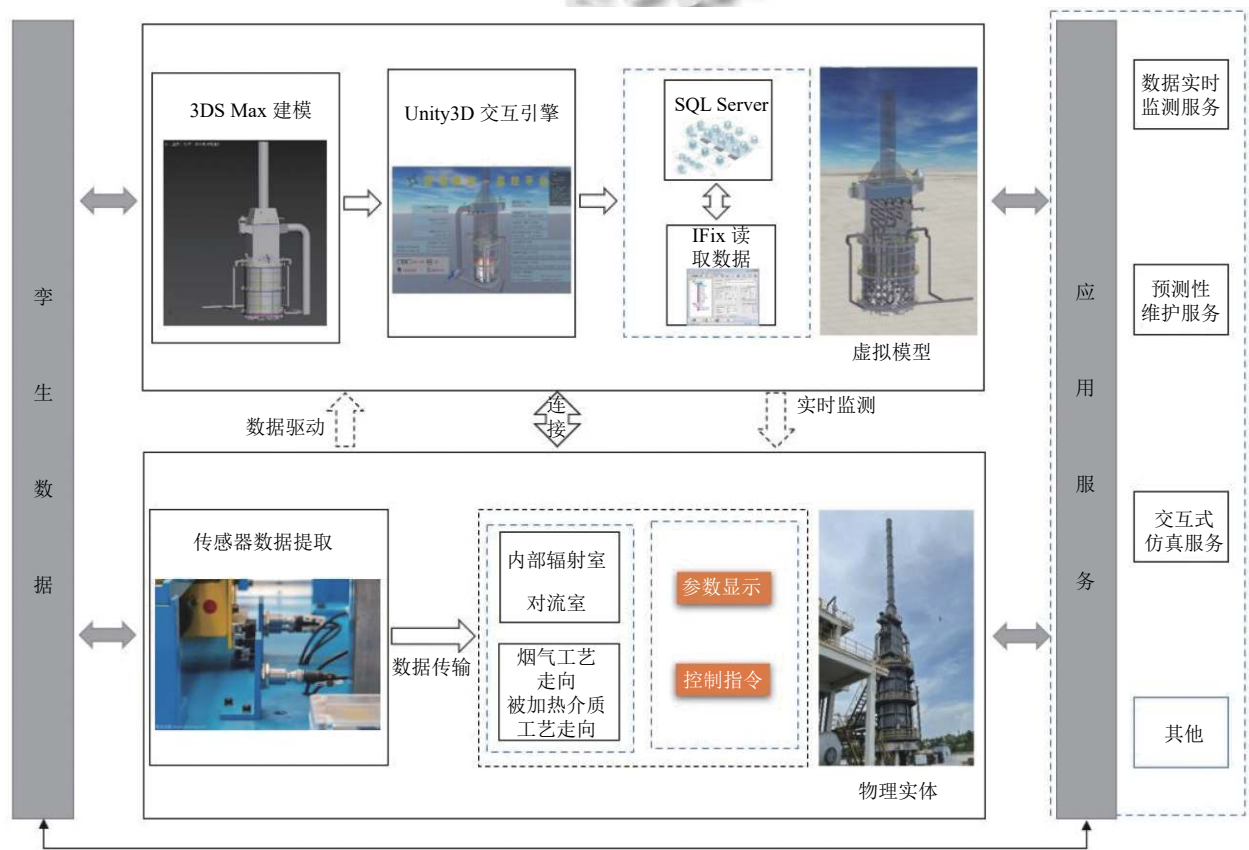


图4 数字孪生加热炉框架

3.5.1 方案概述

为了提高装置参数目视化管理水平,装置运行安全性,需开展IFix操作画面3D可视化技术研究,使重要设备的监控参数显示得更加直观、清晰,操作更加便捷.原稳装置加热炉关键设备在IFix上位操作画面进行3D建模,通过建立并观察原稳加热炉3D模型,

对加热炉主体进行直观立体的展示,在炉身的一侧,能看到所有仪器的温度和压力等数据,在实际操作状态下,可以向操作人员展现加热炉工作原理,利用颜色、明暗、透明度等三维立体属性信息向技术人员展示720°加热炉内部结构,基于IFix数据库,采用SQL Server数据库进行数据存储.根据IFix内的实时数据

进行实时更新,保证了数据的准确性和可靠性,不会出现卡顿现象.通过辐射室、对流室、炉管、烟道挡板多个不同角度的结构和运行参数,可以从外部直观地反映炉身的结构和运行参数.

3.5.2 突出特点

使用虚拟仿真技术,仿真技术是虚拟现实技术最重要的表现形式,也被称为虚拟现实或虚拟呈现.基于虚拟仿真技术构建原稳装置加热炉,可以在原稳加热炉上的岗位人员可以更加直观地掌握原稳加热炉状态,为运行操作提供更加详细的辅助信息,提高岗位人员培训效果,并且可以嵌入加热炉效率计算、故障分析等功能,为油气生产装置向“智能化”方向发展做准备.

3.5.3 关键技术

利用3D建模软件3DS MAX对原稳装置加热炉进行3D建模后,利用Unity3D软件对火焰进行显示,并根据阀门开度、气阀开度和压力参数的变化,实时地显示火焰状态.通过C#将加热炉各温度,压力参数引入到3D画面中.在IFix数据库的基础上,在工控机内创建ODBC数据源,使用IFix数据库中的SQL模块绑定SQL Server中的db1数据库,使用SQD与SQT数据块对本地加热炉数据进行传输,加入链接至GE IFix上位操作系统,岗位操作人员及技术人员、管理人员可一键点击进入加热炉界面,并可实时旋转加热炉,查看内部结构和实时监测数据,关键技术如下.

(1) 3DS MAX软件构建加热炉模型.

(2) Unity3D软件进行加热炉外观美化,动画制作,虚拟引擎编辑.

(3) 数据库采用MySQL或者SQL Server.

(4) IFix连接获得实时数据或者直接读取数据库中数据.

3.5.4 实现效果

通过对原稳装置加热炉关键设备在IFix上位操作画面进行3D建模,能从多个角度进行观测,操作界面流畅、清晰.提高了装置参数目视化管理水平,装置运行安全性,使原稳重要设备,加热炉的监控参数显示得更加直观、清晰,实现了数据监测功能、异常数据报警功能以及数据显示功能.操作更加便捷.其次,3D画面可直观对加热炉本体各参数进行立体显示,包括内部辐射室、对流室、烟气工艺走向、被加热介质工艺走向及对实时的参数变化进行监控.实现了从外部观

察加热炉、按下透明按钮让加热炉外壳透明化查看加热炉内部构造,可以更好地了解加热炉的各部位的内部构造并通过加热炉的不同火焰状态可以调整火焰、实时的指南针指向功能、按下旋转键可以从加热炉的各个角度观察到加热炉.提高了日常对装置管理水平,强化了操控的精准度,并可让操作人员、各级管理人员对加热炉本体内部的构造、运行参数更直观的进行操作与分析管理,从而增加了装置运行的安全性与可靠性.

可以预见,在工业4.0大环境推动下,数字孪生技术在智慧工厂领域将要爆发出巨大的能量,有着极大的应用前景.

4 结论

本文通过梳理数字孪生技术的发展脉络,阐述了数字孪生的基本概念,解读数字孪生技术研究的意义,探索了数字孪生技术应用在工厂、城建以及医疗领域的应用及进展,叙述了本研究团队利用数字孪生技术实现原油稳定加热炉监控平台的研究成果.在工业制造领域,数字孪生技术研究最多,发展最快,已经进入初步实施阶段,是其应用主赛道.而在数字孪生城市和医疗领域处于起步阶段,主要由政府和高校推动,处于概念模型和局部场景探索阶段.

数字孪生技术是工业4.0、智慧城市、智慧医疗的主要驱动技术,其能量和价值毋庸置疑,虽然数字孪生技术离现实落地应用有很大差距,很多基础性设备和技术不能满足要求,但数字孪生技术应用前景十分美好与广阔.

参考文献

- 1 Tuegel EJ, Ingrassia AR, Eason TG, *et al.* Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011, 2011: 154798.
- 2 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. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(4): 753-768.
- 3 Negri E, Fumagalli L, Macchi M. A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*, 2017, 11: 939-948. [doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.198]
- 4 Uhlemann THJ, Schock C, Lehmann C, *et al.* The digital

- twin: Demonstrating the potential of real time data acquisition in production systems. *Procedia Manufacturing*, 2017, 9: 113–120. [doi: [10.1016/j.promfg.2017.04.043](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.043)]
- 5 Lee J, Bagheri B, Kao HA. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 2015, 3: 18–23.
- 6 Grieves MW. Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises. *International Journal of Product Development*, 2005, 2(1–2): 71–84.
- 7 Grieves M. *Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking*. New York: McGraw-Hill Companies, 2006.
- 8 Li CZ, Mahadevan S, Ling Y, *et al.* A dynamic Bayesian network approach for digital twin. *Proceedings of the 19th AIAA Non-deterministic Approaches Conference*. Grapevine: AIAA, 2017. 1566.
- 9 汪郡. 西门子推出 MindSphere 开放工业云. *轻工机械*, 2016, (3): 48.
- 10 何江. 工业互联网架构实例分析——以 GE 公司 Predix 为例. *信息通信*, 2017, (11): 140–142.
- 11 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. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(1): 1–9.
- 12 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(1): 1–18.
- 13 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(1): 1–18.
- 14 丁华, 杨亮亮, 杨兆建, 等. 数字孪生与深度学习融合驱动的采煤机健康状态预测. *中国机械工程*, 2020, 31(7): 815–823.
- 15 武颖, 姚丽亚, 熊辉, 等. 基于数字孪生技术的复杂产品装配过程质量管控方法. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(6): 1568–1575.
- 16 张超, 周光辉, 肖佳诚, 等. 数字孪生制造单元多维多尺度建模与边-云协同配置. *计算机集成制造系统*, 2023, 29(2): 355–371. [doi: [10.13196/j.cims.2023.02.001](https://doi.org/10.13196/j.cims.2023.02.001)]
- 17 李晓雪, 韩赛伟. 基于数字孪生的采煤机预测性维护研究. *煤矿机械*, 2022, 43(1): 173–176.
- 18 Bonnell DN, Tatarinov KL, Picard MW. System for monitoring and managing computer resources and applications across a distributed computing environment using an intelligent autonomous agent architecture: US, 5655081. 1997-08-05.
- 19 王巍, 刘永生, 廖军, 等. 数字孪生关键技术及体系架构. *邮电设计技术*, 2021, (8): 10–14.
- 20 李浩, 王昊琪, 刘根, 等. 工业数字孪生系统的概念、系统结构与运行模式. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(12): 3373–3390.
- 21 李亚娟, 王海峰. 基于 VR 技术的虚拟旅游系统的设计与实现. *自动化与仪器仪表*, 2019, (9): 195–197, 201.
- 22 Azuma RT. A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1997, 6(4): 355–385. [doi: [10.1162/pres.1997.6.4.355](https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355)]
- 23 汪洋. 疫情背景下 MR 旅游项目发展的思考. *企业科技与发展*, 2020, (4): 237–238.
- 24 李刚, 蔡骏峰, 刘海琼, 等. 探索增强现实、虚拟现实和混合现实技术在电力系统的应用. *电子世界*, 2020, (22): 172–173.
- 25 Söderberg R, Wärmefjord K, Carlson JS, *et al.* Toward a digital twin for real-time geometry assurance in individualized production. *CIRP Annals*, 2017, 66(1): 137–140. [doi: [10.1016/j.cirp.2017.04.038](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.038)]
- 26 Schleich B, Anwer N, Mathieu L, *et al.* Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals*, 2017, 66(1): 141–144. [doi: [10.1016/j.cirp.2017.04.040](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.040)]
- 27 孙萌萌. 飞机总装配生产线数字孪生系统若干关键技术研究 [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- 28 Iglesias D, Bunting P, Esquembri S, *et al.* Digital twin applications for the JET divertor. *Fusion Engineering and Design*, 2017, 125: 71–76. [doi: [10.1016/j.fusengdes.2017.10.012](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.10.012)]
- 29 Knapp GL, Mukherjee T, Zuback JS, *et al.* Building blocks for a digital twin of additive manufacturing. *Acta Materialia*, 2017, 135: 390–399. [doi: [10.1016/j.actamat.2017.06.039](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.06.039)]
- 30 姜建彪. 3D 打印无人车间设计及其移动物流数字孪生系统研发 [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- 31 Farid AM. Measures of reconfigurability and its key characteristics in intelligent manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2017, 28(2): 353–369. [doi: [10.1007/s10845-014-0983-7](https://doi.org/10.1007/s10845-014-0983-7)]
- 32 Aivaliotis P, Georgoulas K, Chryssolouris G. The use of digital twin for predictive maintenance in manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2019, 32(11): 1067–1080. [doi: [10.1080/0951192X.2019.1686173](https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1686173)]
- 33 Bao JS, Guo DS, Li J, *et al.* The modelling and operations for the digital twin in the context of manufacturing. *Enterprise Information Systems*, 2019, 13(4): 534–556. [doi: [10.1080/17517575.2018.1526324](https://doi.org/10.1080/17517575.2018.1526324)]
- 34 江海凡, 丁国富, 肖通, 等. 数字孪生演进模型及其在智能制造中的应用. *西南交通大学学报*, 2022, 57(6): 1386–1394.
- 35 Zhang QL, Yang ZW, Duan JG, *et al.* Three-dimensional

- visualization interactive system for digital twin workshop. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2021, 37(2): 137–152.
- 36 杜莹莹, 罗映, 彭义兵, 等. 基于数字孪生的工业机器人三维可视化监控. *计算机集成制造系统*, 1–15. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20220110.1032.002.html>. (2022-01-10)[2023-03-27].
- 37 李彦瑞, 杨春节, 张瀚文, 等. 流程工业数字孪生关键技术探讨. *自动化学报*, 2021, 47(3): 501–514.
- 38 刘占省, 张安山, 王文思, 等. 数字孪生驱动的冬奥场馆消防安全动态疏散方法. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(7): 962–971. [doi: 10.11908/j.issn.0253-374x.19512]
- 39 Niu YH, Lu WS, Chen K, *et al.* Smart construction objects. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2016, 30(4): 04015070. [doi: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000550]
- 40 樊启祥, 林鹏, 魏鹏程, 等. 智能建造闭环控制理论. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61(7): 660–670.
- 41 刘占省, 刘子圣, 孙佳佳, 等. 基于数字孪生的智能建造方法及模型试验. *建筑结构学报*, 2021, 42(6): 26–36.
- 42 潘巧燕. 规建管一体化在智慧城市建设中的探讨. *电信快报*, 2020, (1): 24–27.
- 43 周瑜, 刘春成. 雄安新区建设数字孪生城市的逻辑与创新. *城市发展研究*, 2018, 25(10): 60–67. [doi: 10.3969/j.issn.1006-3862.2018.10.008]
- 44 毛子骏, 黄膺旭. 数字孪生城市: 赋能城市“全周期管理”的新思路. *电子政务*, 2021, (8): 67–79.
- 45 李林, 程承旗, 任伏虎. 北斗网格码: 数字孪生城市 CIM 时空网格框架. *信息通信技术与政策*, 2021, (11): 1–5.
- 46 毛超, 岳奥博, 沈力, 等. 数字孪生技术支撑下城市智慧治理隐秩序显性化的方法体系构建. *城市发展研究*, 2021, 28(8): 56–62.
- 47 侯增广, 赵新刚, 程龙, 等. 康复机器人与智能辅助系统的研究进展. *自动化学报*, 2016, 42(12): 1765–1779.
- 48 Korshoej AR, Saturnino GB, Rasmussen LK, *et al.* Enhancing predicted efficacy of tumor treating fields therapy of glioblastoma using targeted surgical craniectomy: A computer modeling study. *PLoS One*, 2017, 11(10): e0164051.
- 49 Naplekov I, Zheleznikov I, Pashchenko D, *et al.* Methods of computational modeling of coronary heart vessels for its digital twin. *MATEC Web of Conferences*, 2018, 172: 01009. [doi: 10.1051/mateconf/201817201009]
- 50 Björnsson B, Borrebaeck C, Elander N, *et al.* Digital twins to personalize medicine. *Genome Medicine*, 2020, 12(1): 4. [doi: 10.1186/s13073-019-0701-3]
- 51 Croatti A, Gabellini M, Montagna S, *et al.* On the integration of agents and digital twins in healthcare. *Journal of Medical Systems*, 2020, 44(9): 161. [doi: 10.1007/s10916-020-01623-5]
- 52 胡天亮, 连宪辉, 马德东, 等. 数字孪生诊疗系统的研究. *生物医学工程研究*, 2021, 40(1): 1–7.
- 53 王焱, 王湘念, 王晓丽, 等. 智能生产系统构建方法及其关键技术研究. *航空制造技术*, 2018, 61(S1): 16–24.
- 54 崔一辉, 杨滨涛, 方义, 等. 数字孪生技术在航空发动机智能生产线中的应用. *航空发动机*, 2019, 45(5): 93–96.
- 55 黄俊波, 鹿泽伦, 王磊, 等. 基于数字孪生技术的直升机质量管理应用方法探索. *直升机技术*, 2020, (2): 68–72.
- 56 张素明, 岳梦云. 基于数字孪生的火箭测试与发射过程健康管理技术研究. *计算机测量与控制*, 2021, 29(5): 8–14.
- 57 吴浩, 杨帆, 王斌, 等. 基于数字孪生的火箭结构设计制造与验证技术研究. *宇航总体技术*, 2021, 5(2): 7–13.
- 58 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. *计算机集成制造系统*, 2022, 28(8): 2291–2301.
- 59 郝博, 王建新, 王明阳, 等. 基于数字孪生的装配过程质量控制方法. *组合机床与自动化加工技术*, 2021, (4): 146–149, 153.
- 60 张文杰, 王国新, 阎艳, 等. 基于数字孪生和多智能体的航天器智能试验. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(1): 16–33.
- 61 刘震磊, 戚明轩, 王环, 等. 基于数字孪生技术的准确度检测平台开发及应用. *航空精密制造技术*, 2021, 57(2): 4–8.

(校对责编: 牛欣悦)