

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407590

数字孪生技术及其在宇航领域中的应用综述

宋海龙 潘建立 姜震 朱玉婷 刘燕 袁超 罗震 王鹏

(北京东方计量测试研究所 北京 100086)

摘要:随着智能传感和新一代信息技术的快速发展,数字孪生技术正在引领产业变革。概述了数字孪生的发展历史、概念、特点和相关技术,目前各机构和学者还没有对数字孪生的概念形成通用的理解,未来还需要展开广泛的讨论和研究;总结了数字孪生在美国宇航领域的应用情况,详细论述了国内宇航领域在设计、生产和运维等几个阶段中数字孪生技术的应用现状,当前的主要问题是虚实之间还没有建立起有效联系,所以还没有真正实现由虚拟模型直接对物理实体进行指导和优化;并给出了航天领域应用数字孪生仍需要持续解决的技术问题,包括传感和数据处理、高保真度模型、软件工具平台建设、与人工智能等新一代技术结合等。当前数字孪生技术在航天领域的应用还处在起步阶段,未来还需要积极拓展应用范围和场景,才能更大程度的发挥数字孪生技术的价值和作用。

关键词:数字孪生;仿真模型;数据驱动;传感;航天器

中图分类号: TP29; TN05 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.6520

Review of digital twin technology and its application in aerospace

Song Hailong Pan Jianli Jiang Zhen Zhu Yuping Liu Yan Xi Chao Luo Zhen Wang Peng

(Beijing Orient Institute of Measurement & Test, Beijing 100086, China)

Abstract: With the rapid development of intelligent sensing and new generation information technology, digital twin technology is leading the transformation of obstetrics. This article provides an overview of the development history, concepts, characteristics and related technologies of digital twin. At present, there is no universal understanding of the concept of digital twin among various institutions and scholars, and extensive discussions and research are needed in the future. It summarizes the application of digital twins in aerospace in the United States, and elaborates on the current application status of digital twin technology in the design, production, and operation stages of domestic aerospace. The current main problem is that there is still no effective connection between virtual and real entities, and so the direct guidance and optimization of physical entities by virtual models have not been truly achieved. It also summarizes the technical problems that still need to be continuously solved in the application of digital twins in aerospace, including sensing and data processing, high fidelity models, software platform construction, integration with new generation technologies such as artificial intelligence, etc. The current application of digital twin technology in aerospace is still in its early stages, and in the future, it is necessary to actively expand its application scope and scenarios in order to maximize the value and role of digital twin technology.

Keywords: digital twin; simulation model; data driven; sensing; spacecraft

0 引言

近年来,新一代信息技术迅速发展,全球正在进行物联网、智联网等智能化建设,越来越多的智能传感器被设计并采用,人们感知世界的能力大幅提升。世界已经进

入智能化的“工业 4.0”时代,其核心特点是深度应用智能传感、大数据和信息通信等新兴技术实现物理世界和虚拟世界的融合。我国“十四五”规划中强调迎接数字时代,促进数字技术与实体经济深度融合。

在航空航天、工业制造等各领域,随着新材料的应用和人工智能等新兴技术的发展,卫星、空间站、工业机器

人等典型装备日趋复杂,这些复杂装备和系统也都配置有大量传感器,亟需提升复杂装备数字化和智能化水平,并降低运行和维护成本。在当前实际需求牵引和技术发展的基础上,尤其是智能传感及物联网、大数据和云计算等相关技术的发展和运用,数字孪生技术近年来出现并快速发展,正在引领深刻产业变革。不同的文献概述了数字孪生技术的发展历史^[1]、定义^[1-2]和模型^[1]、主要特征^[2]和技术支撑^[3-4]、需要避免的认知误区^[5]、所面临的挑战^[1-6]、发展趋势^[3,6],并给出了在工业和制造业^[2-4]、医疗^[2-3]、航空^[2,4]、智慧城市^[3]等领域应用情况。在数字孪生非常适合的宇航领域中,多篇文献针对具体应用思路或少数组件的开发应用展开讨论,缺少针对宇航领域的发展现状进行综合论述。

为全面总结数字孪生技术理论研究和在宇航领域的应用现状及未来发展,本研究系统介绍数字孪生技术的发展过程、定义、系统概念模型和相关技术,并详细阐述数字孪生技术在美国和国内宇航领域的应用现状和未来技术发展方向。

1 数字孪生技术

由物理实体(或称物理对象,包括设备、系统或过程等)、数字实体(也称数字孪生体)、二者之间的数据连接及其数据和接口等要素就构成了数字孪生系统。数字孪生系统基于数字实体和融合数据双驱动,通过物理实体和数字实体的数据连接,描述物理实体多维属性,给出物理实体的实际行为和状态并分析其未来发展趋势,从而实现物理实体的仿真、监控、预测和优化等实际服务功能,达到物理实体与数字实体的共生。数字孪生技术作为一种前沿技术,虽然出现的时间仅为 20 年左右,但是已经引起了学术界与工业界的广泛关注,世界著名信息技术研究与顾问咨询公司 Gartner 公司在 2017~2019 年连续 3 年将数字孪生列入十大战略科技发展趋势。有报道估计到 2028 年,全球数字孪生市场的收入将超过 1 100 亿美元,从 2023~2028 年的复合年增长率将超过 60%。

1.1 数字孪生技术的发展

在制造领域中使用“孪生体”概念,可以追溯到美国国家航空航天局(national aeronautics and space administration, NASA)的阿波罗计划,当时 NASA 制造完全相同的两个飞船,置于地面上的飞船称为孪生体(twin),利用此孪生体在地面完成与执飞任务飞船相同的“所有”操作,以此来反映和预测实际飞行飞船的状态,并在关键时刻为在轨航天员的决策提供辅助信息。

数字孪生的概念,普遍认为是在 2003 年由美国密歇根大学提出,当时称为“与物理产品等价的虚拟数字化表

达”,并没有称之为数字孪生。由于当时技术和认知上的局限,这个早期的概念并没有得到广泛关注,但是已经具备了数字孪生的基本组成要素,因此被认为是数字孪生的雏形。2010 年, NASA 在《建模、仿真、信息技术和处理路线图》草案中首次书面提出“数字孪生”,并说明了航天器数字孪生的概念和功能^[7], 2012 年, NASA 和美国空军研究实验室联合提出了未来飞行器的数字孪生体范式^[8]。此后,数字孪生的概念开始得到广泛的重视,不同机构开展其关键技术研究,数字孪生的应用也从飞行器运行维护拓展到智慧城市、产品研发、装备制造等众多场景中,涵盖产品设计、制造、服务与运维等产品生命周期各个阶段。

1.2 数字孪生的定义

数字孪生虽然得到了学术界和工业界的广泛关注和研究,但目前尚无被普遍接受的统一定义,其概念仍处于发展与演变中。Grieves 等^[9]定义数字孪生是一组虚拟信息结构,它可以从小微观原子级别到宏观几何级别全面描述潜在制造或实际存在的产品。在理想情况下,数字孪生可以提供通过测量实际产品获得的所有信息。。2012 年, NASA 和美国空军联合定义航天器数字孪生^[8]是充分利用物理模型、传感器更新数据、航天器历史记录等,对已竣工航天器或系统的集成多物理量、多尺度的概率性仿真,以反映其对应应在轨航天器的全生命周期状态,这是被引用最多的数字孪生的定义。随着数字孪生在不同领域广泛应用,不同研究机构、学者和企业也提出了自己对数字孪生定义的理解,正是因为这些不同的定义,也促进了大家对定义的思考 and 讨论。

数字孪生体具有以下特点:集成有物理实体的各类数据,是物理实体的忠实映射;在物理实体全生命周期内存在并与其共同进化,相关知识不断积累;不仅能对物理实体进行描述,而且能基于模型对物理实体进行优化。值得注意的是,“数字仿真”和“数字孪生”这两个术语常被混淆理解和使用,然而,在物理实体和数字实体之间的数据集成水平上,这两个定义有所不同^[3],如图 1 所示。

1) 数字仿真,数字实体是对物理实体的数字表达,物理实体和数字实体之间不存在自动数据交换。数字表达包括对物理实体的全面或部分描述模型,这些描述模型可能包括新产品的数学模型,或是计划建造的工程模型,亦或是一个物理实体的任何其他模型,但是这些模型不存在任何形式的自动数据交换。现有物理实体的数字数据也可用于开发数字实体,但所有数据交换都是以手动方式进行。物理实体的状态变化对数字实体没有直接影响,反之亦然。图 1(a)是数字仿真。

2) 数字孪生,进一步说,如果现有物理实体和数字实体之间为自动双向数据流,则将其称为数字孪生。在这种组合中,物理实体的状态变化,会直接导致数字实体的

状态变化,反之亦然。图1(b)为数字孪生。

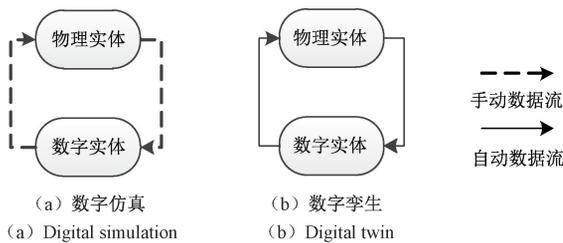


图1 数字仿真和数字孪生

Fig.1 Digital simulation and digital twin

在数字孪生系统中,可以说数字实体是物理实体的虚拟副本,利用此虚拟副本可以对物理实体进行模拟、监控和优化性能,它在航空、航天、制造业、医疗保健、能源和建筑等多领域有广泛的潜在应用。使用数字孪生体的优点如下。

1) 提高性能,改善设计。利用数字孪生体可以实时模拟和分析物理实体的行为,从而帮助优化物理实体运行性能;利用数字孪生体可实现产品性能的仿真测试,完成产品设计优化。

2) 提高效率,降低成本。通过持续监测物理实体的性能和健康状态,数字孪生体可以确定正常运行维护和预测性维护的时间,减少停机时间,降低运维成本和提高生产效率,延长资产寿命。

3) 提升安全性,降低风险。利用数字孪生体,通过实时监控可以保障高端设备运行安全;通过模拟和测试空间极端环境或潜在危险场景及处置方案,大幅提升实际运行时人员和设备的安全性。

国际上几个工业软件巨头开发了多款软件工具,推动了数字孪生技术的应用和快速发展。2016年,美国通用电气公司推出各工业领域通用的数字孪生创建工具“Predix”软件,它可以实现高端设备的健康状态监测和预防性运维。德国西门子公司于2017年推出“MindSphere”的软件平台,它基于物联网并利用数十亿的传感数据流,实现物理空间从产品设计到制造执行的全过程数字化。美国参数技术公司推出了“ThingWorx”物联网平台,基于数字孪生可以为客户提供高效的产品售后服务与支持。美国ANSYS公司于2018年推出软件包“Twin Builder”,它能够快速构建和部署物理产品的数字孪生,再现设备的全生命周期状态。美国国际商业机器公司开发了“Watson 物联网平台”,基于此平台可以开发数字孪生系统。法国达索系统公司推出3D EXPERIENCE 体验平台,可以实现物理产品与数字孪生互动,从而优化产品实体。国内专家也针对数字孪生技术展开了大量研究。国内高校从2017年开始举办“数字孪生与智能制造服务学术会议”,会上专家和机构分享

和讨论数字孪生的理论发展与技术进步,到2023年已经举办了七届会议。中国电子信息产业发展研究院和多个产业联盟等机构发布了多个数字孪生方面的白皮书,推动数字孪生的技术发展和产业应用。多个数字孪生方向的项目得到了国家工信部、科技部、自然科学基金委和国防科工局等部门的战略性资助。陶飞等^[7]在数字孪生理论研究和应用方面取得了显著成果,他们在2017年提出了“数字孪生车间”的概念,提出的“数字孪生五维模型”丰富了对数字孪生概念的理解,出版了专著多部,2021年创办了国际综合类期刊“Digital Twin”。

近年来,国际标准化组织(international organization for standardization, ISO)、国际电工委员会(international electrotechnical commission, IEC)和美国电气和电子工程师协会(institute of electrical and electronics engineers, IEEE)等国际和区域标准组织都在积极推进数字孪生标准化工作,比如在制造过程中应用数字孪生技术的系列标准ISO 23247已经发布^[10]。国内的中国电子技术标准化研究院以及多家企业和高校,都在积极开展数字孪生工业软件的相关国家、行业 and 团体标准的立项及编制工作和国际标准的采标转化工作。GB/T 43441 信息技术数字孪生系列标准中的第1部分:通用要求^[11],已经正式发布并在2024年6月开始实施,此标准对数字孪生的参考架构、基本要求、功能要求和安全要求等进行了规定,该系列标准中的其他部分也正在征求意见或编制中。经中国机械工业联合会批准并正式发文公告,首套系列团体标准《数字孪生车间系列团体标准》正式发布实施,为推动企业数字化转型与智能化升级的标准化实施具有重要意义。

1.3 数字孪生系统的概念模型和相关技术

Grievens^[12]给出的数字孪生系统基本概念模型如图2所示,包含3个主要部分:物理空间的物理实体;虚拟空间的数字实体;将数字实体和物理实体联系在一起的数据和信息的连接。数字孪生体的本质是在全生命周期内,能够实时、准确反映物理实体的状态,并完成自身的演化,且能够模拟和预测物理实体的行为。因此,构建数字孪生体需要以下3个关键要素^[13]:首先是物理实体的数字模型,考虑到系统参数时变性和环境参数不确定性,模型很难实时准确反映物理实体状态;其次是物理实体上部署的众多传感器,能够实时获取物理实体运行数据,可以用来改善模型和降低不确定性引起的影响,提升模型准确度和预测能力;最后是数字模型和物理实体的交互,利用数字模型及数据分析和预测并优化物理实体的实际运行,这也是数字孪生与数字仿真的根本区别。

文献[11]给出的数字孪生系统概念模型和参考框架如图3所示,基于数据驱动和孪生互动过程,数字实体和物理实体之间实现动态迭代,数字实体和物理实体通

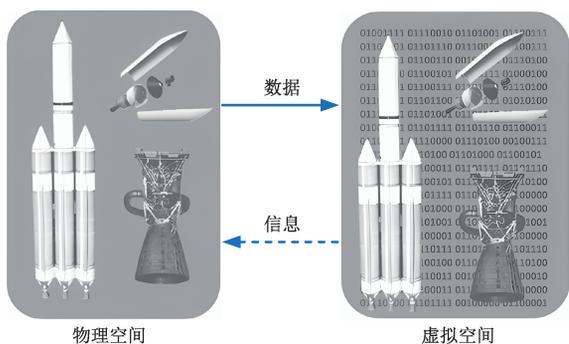
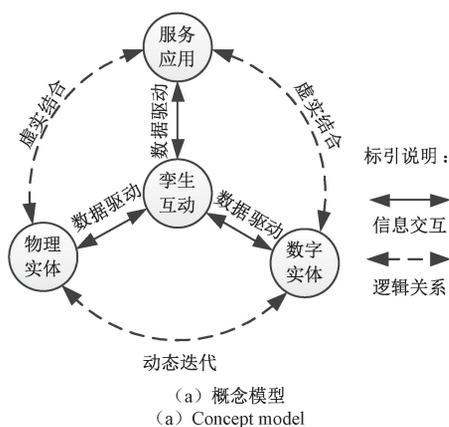


图 2 Grieves 教授给出的数字孪生系统基本概念模型

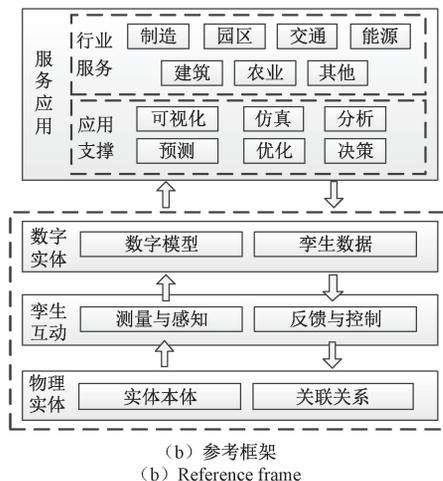
Fig. 2 Concept model of digital twin system by professor grieves

过虚实结合提供服务应用,其中孪生互动包括测量与感知、反馈和控制;数据驱动包括数据采集、分析以及基于数据的决策和执行,并在迭代优化中形成知识;虚实结合是物理实体和数字实体之间通过物联网等技术手段实现双向映射、动态交互与实时连接,提供可视化、仿真、分析、预测、优化和决策等服务应用;动态迭代是数字实体实时接收物理实体的数据以完成迭代优化,物理实体实时接收数字实体的反馈以完成辅助决策。

可以说数字孪生系统是由多系统组成的复杂系统,数字孪生体的实现需要依赖智能传感器、物联网、新一代通信技术、云计算、人工智能、虚拟现实、增强现实等诸多数字技术的融合创新,正是由于这些数字技术的快速发展,数字孪生技术才有广泛的潜在应用场景。考虑数字孪生系统的概念模型和应用框架,主要涉及以下几类技术:1)虚实交互技术。主要包括物理实体感知、信息驱动虚拟模型运转、控制实体等几个方面,数字孪生系统需要通过智能传感器、卫星定位系统、射频识别设备等信息传感设备,实时感知物理世界的数据;收集到物理空间的信息后将它们映射到虚拟空间,并利用这些信息驱动虚拟模型的运转和更新;为实现物理实体性能的改善,还需要电气控制、嵌入式控制、液压控制等技术。2)孪生体模型构建技术。创建高保真的数字孪生虚拟模型是数字孪生的核心,也是实现模型驱动的基础,模型构建既可以从结构、物理、逻辑和功能等多维度的,也可以是机械、电学、传热、液压等多领域的,还可以是元件、单机、分系统、系统等多层次的,同时需要考虑空间维度的多模型组装实现复杂对象模型的构建,从多维度、多领域、多层次进行模型融合实现复杂物理对象或过程的全面真实刻画与描述。在实际应用中,可以根据物理对象情况和实际需求构建部分维度或领域的模型。3)数据管理和知识获取技术。数据管理技术需要融合打通多维/多源/多层次的数据孤岛,增加数据共享和复用能力,提供全要素/全流程/全业务数据的支持,在全生命周期实现数据存储、处理、融合和知识获取、可视化等。4)可靠连接和高效传输



(a) 概念模型
(a) Concept model



(b) 参考框架
(b) Reference frame

图 3 文献[11]给出的数字孪生系统概念模型和参考框架

Fig. 3 Concept model and reference frame of digital twin system by reference [11]

技术。可靠连接是数字孪生系统各部分之间进行数据和信息传输的保障,传输需要满足高速率、大容量和低时延等要求,以支撑数字孪生系统各部分之间的实时交互,通信接口、协议和标准技术、信息安全技术都是需要考虑的因素。无线传感器网络、物联网、5G 通信技术为数字孪生技术的应用提供了物理世界精准映射和实时感知控制的能力。

综上所述,数字孪生是近年才出现的一项前沿技术,已经成为研究热点。但是目前不同公司、机构和专家对数字孪生的概念有不同的理解和认识,所提出的定义和模型及应用框架都是基于各自领域的需求,并不完全通用。在学术界,需要展开广泛的讨论和研究,只有形成通用而全面的定义,才能促进相关技术和应用的快速发展。国内相关系列标准的实施将加速国内对数字孪生认识的统一和规范研发与应用,对“数字孪生系统”和“数字孪生体”在名词上大多不做区分,都称为“数字孪生”,容易造成理解上的混淆,需要读者在阅读时加以思考和区分。

2 数字孪生技术在宇航中的应用

在宇航领域,航天飞行器系统具有产品成本高、研制难度大、生产批量小等特点,属于典型的复杂产品或系统,其研制和维护都复杂且困难。基于数字孪生技术,将物理实体的传感器实时数据传输至虚拟环境,在研制与运行时,可以实时对飞行器的工作状态进行评估并给出维保建议,使得飞行器能运行在最佳状态,提升综合使用效能。在制造阶段建立并利用车间数字孪生体,可以缩短工艺优化周期,提升资源配置效率。

2.1 数字孪生技术在美国宇航领域中的应用

航空航天领域是 NASA 和美国空军探索数字孪生技术应用的先驱领域。他们投入大量资金,研究工作主要集中在飞行器的健康监测和维护、优化飞行器的性能和可靠性,以及机组人员更安全地完成任務等方面。2010年,NASA 发布的太空技术路线图草稿提出^[13],计划在2028年实现 NASA 数字孪生体的目标,同时给出数字孪生技术的4个应用场景:发射前的飞行任务模拟,研究各种任务参数从而最大概率确保任务完成,确定各种异常的影响和验证处理策略;实际飞行器的飞行镜像,基于实际载荷、温度、环境参数对实际飞行器进行预测,利用实际飞行器损坏状态及程度和发动机温度等参数监测实际飞行器的健康状况;发生潜在灾难性故障或损伤时的现场诊断,当实际飞行器上的传感器将其健康状态降级的信息传给数字孪生体时,可以诊断引起飞行器异常的原因;任务参数的修改评估平台,模拟和分析飞行器失效部件引起的运行状况变化,评估飞行器的剩余寿命,为管理人员是否修改任务参数提供依据。NASA 预计到2035年,应用数字孪生技术可以将飞行器维保成本降低50%,服役寿命总体延长10倍^[14]。美国洛马公司计划采用数字孪生技术实现工程设计与制造的衔接,设计阶段产生的实体3维精确模型将可用于加工模拟和数控机床编程等环节,其数字孪生车间如图4所示^[15];这也是世界上首次将数字孪生技术运用到深空探测领域,通过数字孪生技术宇航员将可以实时获得地面指令、模拟数据和解决方案,让宇航员能够更加有效地操作和完成任务^[16]。

卫星星座系统是由大量通信卫星组成巨型星座系统,主要面向宽带互联网接入服务,它是一个可独立运行的互联网系统^[17],是近年来发展的一项热门卫星应用方向。美国太空探索技术公司应用数字孪生技术加速星链星座建设,星链星座设计利用近42000颗低轨通信卫星来提供高速宽带服务,他们基于先进的数字设计软件和优质的供应链资源,快速完成多轮“设计-开发-测试”迭代过程,大幅降低项目成本和提高产能,据称,每颗星链卫星制造成本已经低于50万美元,产能可以达到每天3

颗卫星^[17]。

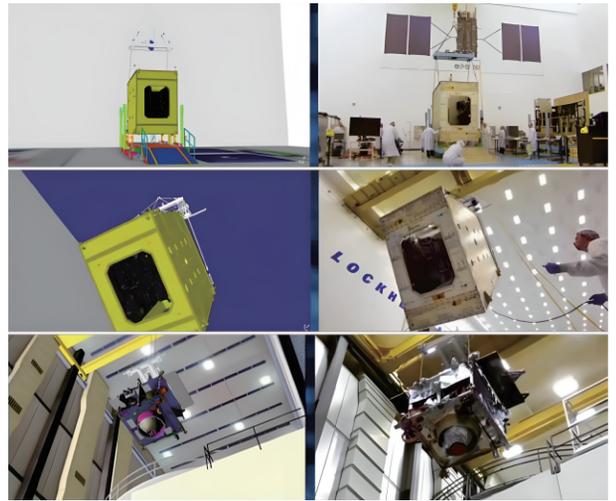


图4 洛马公司数字孪生车间

Fig. 4 Digital twin workshop in Lockheed Martin Aeronautics

2020年12月,美国航空航天学会和美国航空航天工业协会联合^[18]发布《数字孪生:定义与价值》报告,该报告由来自美国工业界、学术界以及政府部门等多位数字孪生专家编制,从设计数字孪生、生产数字孪生、支持和服务数字孪生等3个环节给出了来自通用电气、洛马、诺格、波音、雷声、罗罗等军工巨头的数字孪生实践案例,也提到数字孪生技术应用的一些关键困难和问题,并给出了对策和建议,具有十分重要的参考价值。

2.2 数字孪生技术在国内宇航领域中的应用

在国内宇航领域,经过十余年的发展,航天数字化转型已经取得了显著成就,数字孪生将成为终极发展目标。文献^[19]提出了面向产品全生命周期的数字孪生体系架构,通过构建与实物产品完全对应的数字孪生体,在安全互联和高性能并行计算等支撑技术基础上,利用产品全生命周期数据管理,可以从设计、生产、和运维等多个维度开展数字孪生技术的研究与应用。王建军等^[20]提出了基于数字孪生技术的航天器系统工程整体模型和应用框架,可以实现航天器研制全生命周期虚实双向动态实时交互共融与协同。它综合虚实空间和产品结构等共7个维度,并按照生命周期进展演化分为从设计开始至在轨运行共5个典型阶段模型和应用框架,如图5所示,在技术实现层面,借助大数据、物联网和人工智能等先进技术,构建从物理空间开始到传输层最后到应用层共6层的数字孪生系统架构。

文献^[21]提出将数字孪生卫星引入空间通信网络的应用思路,通过构建单元级、系统级和复杂系统级等不同层级的数字孪生,形成数字孪生空间信息网络统一管理平台,从而实现单元级的卫星全生命周期管控、系统级

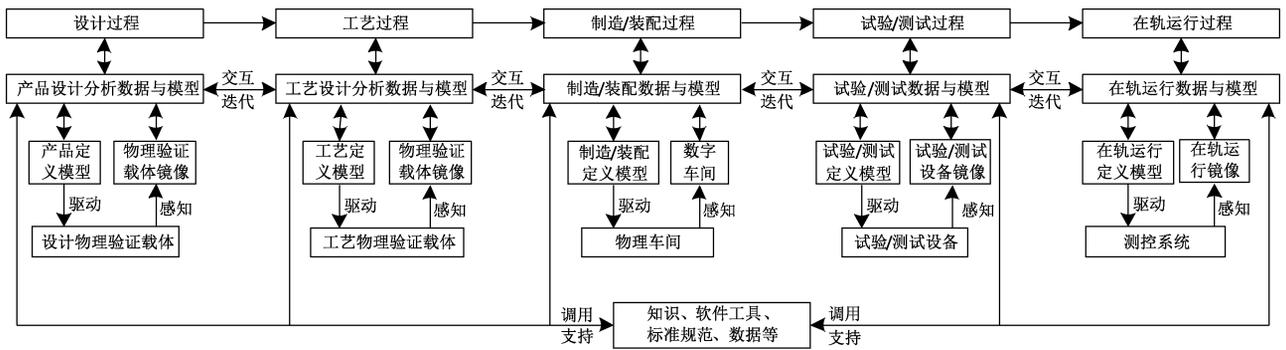


图 5 跨产品生命周期的航天器系统工程数字孪生总体模型框架

Fig. 5 Digital twin overall model framework for spacecraft system engineering across product lifecycle

和复杂系统级的网络构建及优化等。刘蔚然等^[22]以卫星互联网项目为背景提出了数字孪生卫星概念如图 6 所示,从时空两个维度将复杂卫星工程与数字孪生技术紧密结合。时间维度包括地面阶段的总体/详细设计和制造加工、运行阶段的在轨控制和组网运维;在空间维度上,包括试验验证系统、总装测试车间、卫星实物和空间组网等关键对象和场景;利用数字孪生技术形成贯穿产品全生命周期的模型、数据和服务 3 个线程,实现对物理实体的真实映射。数字孪生卫星的构建是庞大的系统工程,该团队已经在卫星总装车间模型构建及其集成管控系统搭建、卫星网络模型及其评价体系构建等方面开展了前期实践工作,为未来卫星工程建设和卫星产业发展进行了有益的理论研究和实践探索。

我国航天专家围绕设计阶段、生产制造阶段、支持和服务 3 个不同阶段所开展了数字孪生技术的理论研究和实践探索情况。

1) 数字孪生技术在设计阶段中的应用

航天领域存在系统设计复杂、方案验证成本高和周期长等问题。在设计阶段的数字孪生技术应用,主要围绕航天控制系统和航天器电推进器及供配电等关键部件和分系统、火箭的结构和控制系统以及起飞安全等开展工作,提高了设计效率,缩短试验周期,降低了成本。

2019 年刘潇翔等^[23]指出,基于模型驱动的航天控制系统设计仿真方式缺乏与实际物理环境的交互,既造成了试验数据的浪费也限制了模型的应用,他们提出了基于数字孪生技术实现智能化方案设计、仿真验证和在轨分析的技术框架,给出的智慧设计仿真系统分为功能支撑、技术实现、泛在应用 3 个层级,利用数字孪生体可以实现多种空间应用场景的设计仿真。文献[24]提出了基于数字孪生技术的航天电推进器优化设计方法,其数字孪生体由机理模型模块和测试数据集模块两部分组成,能够较真实地反映推进器特性,可以提高宽范围参数推进器的设计工作效率。刘治钢等^[25]基于数字孪生概念,提出了航天器供配电数字伴飞系统的概念和设计思

路,并开展了数据驱动模型动态修正方法和供配电系统状态监视与仿真预示等两项关键技术研究,在空间飞行器供配电系统的整器热试验和无线联试中进行测试应用,试验显示仿真值与实时遥测数据具有较好的一致性,稳态工况下最大误差小于 5%,平均误差小于 2%,验证了伴飞系统及模型的正确性和稳定性,证明了此数字孪生方案的可行性。

戴璐等^[26]提出并设计基于数字孪生技术的卫星装备智能设计系统,他们将卫星装备按尺寸和载荷及特点进行分类归纳,建立不同功能模块组成的数据库,依据卫星具体要求根据设计规则自动选择数字功能模块并组合成孪生卫星装备模型,并通过实际数据对数字孪生模型和设计规则在全生命周期内进行实时修正,如图 7 所示。这种标准化卫星装备设计方法,可以提升卫星装备设计效率和一次设计成功率,减少运维阶段修正卫星装备实体成本。

在火箭设计方面,吴浩等^[27]提出了基于数字孪生的火箭结构设计制造与验证技术,包括基于数字孪生技术的结构设计、制造仿真、试验仿真与控制 3 个方面,与现有数字化技术相比,增加面向过程的虚拟映射、模型驱动和数字管理等 3 个要素,强化模型和数据在火箭结构研制过程中发挥的作用,提高了火箭结构的设计效率,缩短了试验周期,为火箭结构研制模式的升级打下基础。文献[28]提出了运载火箭控制系统的数字孪生原型,设计了运载火箭控制系统数字孪生体的基本框架和应用模式。金杰等^[29]提出了基于数字孪生体的火箭起飞安全系统,多维火箭实时数据与三维几何模型融合生成火箭数字孪生体,利用静态仿真调整和控制火箭姿态,采用火箭实时数据实现系统闭环控制,这套系统在发射前可以快速评估和判断火箭的起飞安全性,有效提高火箭的发射可靠性。

2) 数字孪生技术在生产制造阶段中的应用

在航天生产制造环节,属于典型的离散型制造模式,存在产品结构精密、技术复杂且状态多变带来的计划协

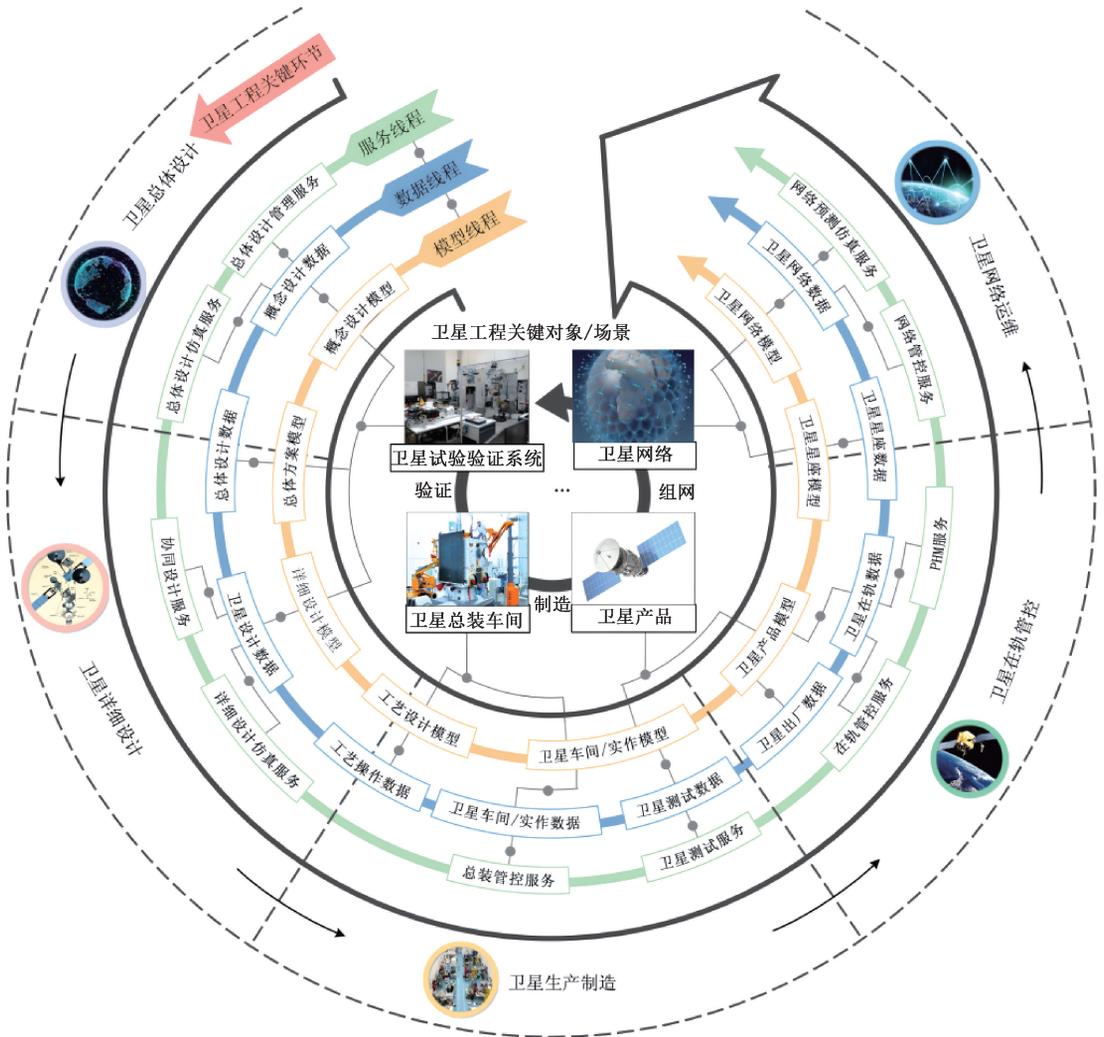


图 6 数字孪生卫星概念内涵

Fig. 6 Concept connotation of digital twin satellite

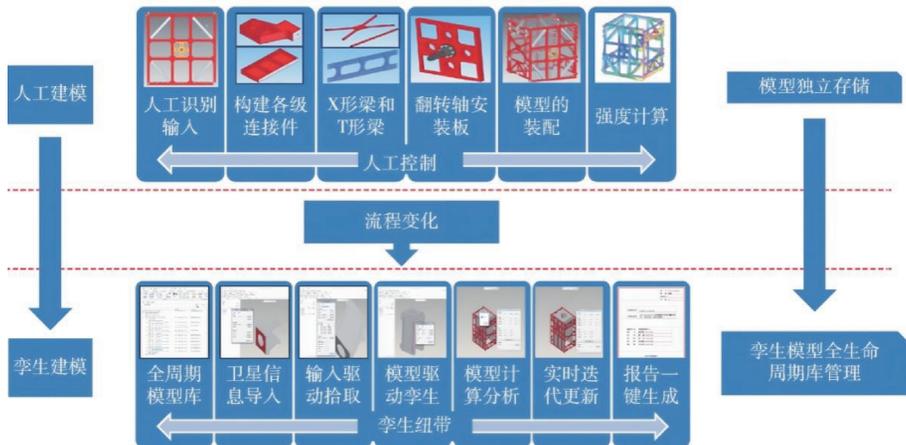


图 7 基于数字孪生的卫星装备设计实例流程

Fig. 7 Example flow of satellite equipment design based on digital twins

专家主要围绕在轨航天器重要分系统的状态评估、火箭测试和发射过程的故障诊断和健康管理、飞控任务仿真演练、空间站状态监控、卫星星座和智慧发射场的建设等,取得了一定的进展和成果。

航天器的电源系统直接影响航天器使用寿命,但在航天器入轨后只能通过遥测数据进行状态评估,存在着对其健康状态监测和全生命周期管理困难等问题。朱凯等^[36]尝试将数字孪生技术应用在空间电源领域,基于内理高精度新型传感器感知电源系统的温度场、内部压力和电势及应变等实时多维参数,建立多维、多尺度的标准化、可进化、可重构的空间电源数字孪生模型,结合人工智能技术,通过机器学习方法完成空间电源的荷电状态和功率状态监测、在轨健康状态和寿命预测,从而实现智能化感知和诊断空间电源系统的状态和分析服役能力,并可以完成空间电源的自主调整和运行策略优化,也为未来的产品可靠性提升和技术发展提供依据。庞景月等^[37]针对航天器一次电源分系统构建数字孪生虚拟模型,采用在轨航天器遥测参数进行校准和迭代确保虚拟模型有效,以此模型作为平台注入6种典型电源系统故障,产生的虚拟故障可以丰富故障样本库,并分析和评估了不同故障检测模型的检测能力,为多种检测模型的自适应选择提供依据,有效提升电源系统故障检测服务质量。文献[38]探讨了复杂卫星系统故障诊断和健康监测的数字孪生框架,提出了将模拟数据、真实遥测数据和融合数据集成,利用数据驱动和基于模型的算法实现对在轨卫星的实时监控与维护,作为应用案例,介绍了基于MWorks仿真平台构建的卫星电源系统数字孪生,利用此平台可以对卫星电源系统的实时状态进行可视化监测和记录,并可基于数据驱动的算法来实现故障诊断和维护决策。

在火箭的测试和发射过程故障诊断及健康管理方面,张素明等^[39]提出了基于数字孪生技术的火箭测试与发射过程健康管理系统方案,通过建立运载火箭测试与发射阶段数字孪生模型,实现天地镜像仿真;依托数字孪生模型,设计和优化运载火箭健康管理功能;利用真实火箭和孪生模型的数据交互,可有效实现火箭测试过程数据分析、飞行过程协同诊断及故障处理决策支持等功能,可为火箭可靠飞行提供技术保障。为实现火箭控制系统的事前诊断和制定维修策略,韩文婷等^[40]提出基于数字孪生的火箭控制系统故障诊断方法,设计出系统组成框架并分析关键技术及应用难点,形成火箭控制系统的数字孪生健康管理平台并总结工作流程,对发射场的智能化建设具有理论借鉴意义。

在轨运行航天器需要顺利完成飞控任务并保证其在轨安全运行。文献[41]总结了航天器数字孪生体在飞行演练和操控与决策等方面发挥的重要作用。航天器成

本高昂且操作复杂,利用其数字孪生体可以对航天器操作人员进行培训,也为多人协同任务演练提供了虚拟化的操作对象,航天院校可以利用其开展教学。利用“数字伴飞”航天器可以在物理航天器处于测控弧段外时获取其运行状态,实现全天时监测物理航天器在轨运行状态。基于航天器软件运行环境的数字孪生体,重构或更新后的软件可以在上注前利用此虚拟环境进行验证和评估,这是快速验证飞控过程中系统重构方案及软件更新的有效手段。基于数字化卫星模型,可以验证星上自主任务规划算法的执行效果,达到决策支持的目的。通过改造航天器数字孪生体模型和修改数据可以模拟航天器不同故障,数字化模拟手段是物理航天器故障复现与预警的一种理想解决方案。袁利等^[42]提出的航天器飞行控制数字孪生系统在嫦娥五号飞控工作中通过了检验,完成了诸如轨道变轨等重大飞控事件的事前仿真校验、轨控和着陆及起飞上升策略的复核和复算、飞控实施指令和参数的检验,在轨测试阶段平行伴飞等重要飞行控制工作。文献[43]基于所设计的卫星数字孪生伴飞系统,开展了在轨卫星状态判读、任务方案迭代和控制参数优化等方面工作,为卫星的任务规划和性能改善发挥了重要作用。面向卫星复杂空间环境下温度状态监测和在轨维护需求,文献[44]构建卫星温度场精细感知与姿态控制系统混合数字孪生模型,并以气浮仿真试验系统等效模拟在轨运行卫星完成了应用验证,为精准把握卫星真实运行状态和快速响应早期风险预警提供了参考和工具。

2021年4月底,天和核心舱在文昌航天发射场由长征五号B运载火箭发射入轨,拉开了中国空间站在轨组装建造序幕,2023年5月底,神十六飞船发射升空,5日后神十五乘组顺利返回东风着陆场,标志着我国空间站建造阶段圆满完成,开启空间站应用与发展的新阶段。为在全生命周期内跟踪并预测长期在轨运行空间站和飞船行为状态,实现更好地实施管理与决策,文献[13]在2020年提出建立由飞行器端、地面端和应用端组成的数字孪生伴飞系统。中国空间技术研究院采用Modelica语言建立的数字孪生空间站系统组成如图9所示,此系统已在空间站在轨运行阶段有效支持空间站在轨飞控工作。数字空间站包含热控、数管、测控、电源等9个分系统多学科数字功能样机模型,共1200余台关键设备,面向推进剂补加和航天员出舱活动等多项关键任务提供全面的仿真支持,有效支撑各项任务圆满成功。数字空间站支持针对能源系统的24小时实时伴飞仿真,实现对空间站能源系统的状态监控。数字空间站的构建和应用,有力提升了空间站系统总体层面的综合仿真验证能力,为空间站后续运营任务提供有力保障^[45-46]。文献[47]针对新时期航天器环境试验的在轨服务新需求,建立基于数字孪生技术的智能试验体系架构,并在某型号正样

试验中进行了应用验证。随着空间站运营、月球基地建设以及近年来空间太阳能电站研究^[48]等重大航天工程项目的开展,这些系统中的大量传感器会产生海量的测量数据,如何保证量值的准确可靠和实现这些测量数据的在轨溯源,也就是“空间计量”^[49],变得越来越重要。一方面需要远程自校准传感技术实现传感器的在轨溯源和校准,一方面也需要这些庞大的数据能够准确、实时和动态地传递给数字孪生体,以保证孪生体的精度和动态特性^[50],这些方面的工作也都在吸引着专家们的注意。

三维场景构建与分析



产品信息查询



多学科仿真分析



在轨遥测数据接口

图 9 数字空间站系统组成框图

Fig. 9 The block diagram of digital space station system composition

统中的应用框架和应用模式,构建由模型层、数据层、支撑层和应用层组成的星座系统数字孪生软件平台,并模块化递进开展卫星星座系统多领域集成建模工作,为未来数字孪生技术在卫星星座系统中的深化应用奠定基础。

针对航天发射场数字化建设和应用需求,文献[51]提出了发射场数字孪生体的概念并总结了组成要素,初步建立了发射场数字孪生体的技术指导框架,设计了集三维设计模型、数字化合练系统、数字化试验系统以及数字化运维系统于一体的演进型数字孪生体,并对其应用模式进行了详细说明,这些成果为我国航天发射场建设和任务执行以及日常运维等工作提供了有益的参考。

综上所述,由于宇航领域的特殊性,NASA 提出数字孪生并制定雄心勃勃的发展计划。在国内,宇航专家主要围绕卫星、火箭、发射场、制造车间、卫星星座和空间站等场景探索应用框架和构想展开讨论,并已经开展部分实践工作。表 1 为在宇航领域的相关应用情况。总体来说,数字孪生技术在宇航领域应用尚处于探索阶段,与建立数字孪生系统的终极目标距离比较远,还需要从设计、制造、运维等多维度、从单机到复杂系统的各层级逐步推进实践探索工作。主要存在的问题是虚实之间还没有建立起有效联系,目前仅是根据物理实体尝试建立起与实体一致的虚拟模型,还没有真正实现由虚拟模型直接对物理实体进行指导和优化,所以也就无法发挥数字孪生体的优势。

文献[17]针对卫星星座系统规模庞大且技术多样、设计难度大等困难,探索了数字孪生技术在卫星星座系

表 1 数字孪生在宇航领域应用情况

Table 1 Applications of digital twin in aerospace

| 类型 | 文献 | 年份 | 单位/机构 | 应用概述 |
|-----------|------|------|----------------------|---------------------|
| 美国应用 | [13] | 2010 | NASA | 总体规划 |
| | [14] | 2016 | NASA | 支持和服务 |
| | [15] | 2020 | 美国洛马公司 | 设计和生产制造 |
| | [16] | 2017 | 美国洛马公司 | 支持和服务 |
| | [17] | 2021 | 太空探索公司 | 产品设计 |
| | [18] | 2018 | 美国国航空航天学会和美国航空航天工业协会 | 应用综述 |
| 国内应用 | [19] | 2022 | 北京宇航系统工程研究所 | 总体规划 |
| | [20] | 2019 | 北京空间飞行器总体设计部 | 总体规划 |
| | [21] | 2019 | 北京航空航天大学 | 总体规划(孪生卫星在空间通信网络应用) |
| | [22] | 2020 | 北京航空航天大学 | 总体规划(数字孪生卫星工程) |
| 国内应用-设计阶段 | [23] | 2019 | 北京控制工程研究所 | 航天控制系统设计验证 |
| | [24] | 2022 | 北京理工大学 | 航天电推进器优化设计 |
| | [25] | 2020 | 北京空间飞行器总体设计部 | 航天器供配电系统设计 |
| | [26] | 2020 | 北京卫星制造厂有限公司 | 卫星装备智能设计 |
| | [27] | 2021 | 北京宇航系统工程研究所 | 火箭结构设计 |
| | [28] | 2021 | 北京航天自动控制研究所 | 运载火箭控制系统设计 |
| | [29] | 2019 | 北京宇航系统工程研究所 | 火箭起飞安全系统设计 |

续表1

Continuation table1

| 类型 | 文献 | 年份 | 单位/机构 | 应用概述 |
|------------------|------|-------------|--------------|-----------------------------|
| 国内应用-生产 制造阶段 | [30] | 2020 | 上海航天精密机械研究所 | 制造车间生产管控方法 |
| | [31] | 2021 | 上海航天精密机械研究所 | 关重件机加车间 |
| | [32] | 2021 | 上海航天精密机械研究所 | 产品自适应装调方法 |
| | [33] | 2022 | 上海航天精密机械研究所 | 制造车间设备能力评估与动态调度 |
| | [34] | 2023 | 上海航天设备制造总厂 | 运载火箭贮箱焊接车间 |
| | [34] | 2023 | 北京卫星制造厂有限公司 | 生产车间可视化监控平台 |
| | [35] | 2019 | 北京理工大学 | 车间的三维可视化实时监控 |
| 国内应用-支持和 服务阶段 | [36] | 2021 | 上海空间电源研究所 | 空间电源的状态监测和寿命预测 |
| | [37] | 2022 | 哈尔滨工业大学 | 航天器一次电源分系统故障 对卫星电源系统实时状态 |
| | [38] | 2020 | 华中科技大学 | 可视化监测和记录 |
| | [39] | 2021 | 北京宇航系统工程研究所 | 火箭测试与发射过程健康管理 |
| | [40] | 2022 | 航天工程大学 | 火箭控制系统故障诊断 |
| | [41] | 2023 | 北京控制工程研究所 | 飞行演练和操控与决策 |
| | [42] | 2021 | 北京控制工程研究所 | 航天器飞行控制 |
| | [43] | 2018 | 北京空间飞行器总体设计部 | 在轨卫星状态判读、任务方案迭代和 控制参数优化等 |
| | [44] | 2023 | 军事科学院 | 卫星温度场精细感知 与姿态控制系统 |
| | [45] | 2022 | 北京空间飞行器总体设计部 | 数字空间站 |
| | [46] | 2021 | 中国空间飞行器总体设计部 | 数字空间站 |
| [47] | 2021 | 北京理工大学 | 航天器智能试验 | |
| [17] | 2021 | 北京卫星环境工程研究所 | 卫星星座系统中的应用 | |
| [51] | 2019 | 北京特种工程设计研究院 | 航天发射场 | |

3 未来发展方向

数字孪生技术虽然出现时间不长,但是已经在航空、航天、汽车制造、电力、智慧城市和医疗等多个领域得到广泛应用。目前,数字孪生技术在航天领域的理论探索和实践应用已经取得了一定的进展。但是,数字孪生系统因涉及多领域综合技术而难以实现,在复杂的航天领域中应用更加困难,需要从单机、分系统到系统和复杂系统的分层级、多维度积极探索和逐步应用,并需在产品全生命周期实现深度协同,促进商业合作模式发展,才能实现可持续发展。从技术角度,未来仍亟需解决如下4类问题。

3.1 传感技术和数据获取及处理

数据是数字孪生技术的基础,智能传感及分布式传感技术使得数字孪生系统能够获得充分而准确的数据支持,适用于耐航天极端环境的高精度、智能化和轻量化传感监测技术值得持续研究,满足飞行器、空间站或月球基地独立运行需求的远程自校准传感技术乃至空间计量技术更是值得关注;同时,加强通信基础设施和高性能计算及存储软硬件的建设,以实现数字孪生系统的海量传感数据高可靠、低延时传输,实现多源异构大数据的数据管

理和实时融合分析处理,保障整个数字孪生系统的实时性。

3.2 高保真度模型的持续优化

各类数字模型和仿真模型的建立是数字孪生的核心,航天领域经过多年的发展,正在逐步建立起各级模型,但是模型的精细度和不同场景下的模型动态调整、特征参数的选择和阈值参数的设置都需要进一步研究,未来还需要持续提升模型精细度和不确定性下的复杂系统动态建模,使系统级数字孪生体不断逼近航天器物理实体,在线实时完成计算分析和系统状态监测及故障诊断,使得数字孪生技术真正发挥作用。

3.3 数字孪生工具平台建设

国内对数字孪生开发平台的研发起步较晚,目前采用的大部分为国外商业软件,需要深入研究这些商业软件的技术根源,以及它们在航天科研生产和复杂场景中的适用性,考虑到数字孪生系统的重要性和安全性,需要发展自主化数字孪生开发和运行集成平台,规范统一各工具的接口以实现软件的协同工作,构建出航天特色的工具软件平台体系,最大程度地发挥数字孪生技术的作用。

3.4 与人工智能等新一代技术紧密结合

航天系统涉及众多技术领域,传感器数量多且数据

量大,充分利用人工智能、大数据和机器学习等新一代技术,自动完成对海量遥测数据的深度知识挖掘,准确评估和精准预测在轨航天器的健康状态,实现系统模型的自我更新和完善,智能决策支持各项在轨飞控任务的顺利实施,大幅提升宇航领域数字孪生系统的服务响应速度和服务准确性。

4 结 论

数字孪生体是目标物理实体或系统的数字化表现,可以实现物理实体的状态监控和故障预测及优化控制,数字孪生技术对推动数字化转型和智能制造具有重要作用。但是目前,对数字孪生的概念还没有形成通用的理解和认识,所提出的定义和模型及应用框架并不完全通用,未来在学术界,还需要展开广泛的讨论和深入研究。数字孪生的概念起源于航天领域,但是总体来看,当前数字孪生技术在航天领域的应用还处在起步阶段,虽然在理论研究与探索中取得了一定进展,但目前仅是根据物理实体尝试建立起与虚实一致的模型,对航天器数字孪生的系统工程应用较少,还需要积极拓展数字孪生技术在航天领域的应用范围和场景,未来还需要在传感和数据处理、高保真度模型、工具平台建设、与人工智能等新一代技术紧密结合等方面需要持续提升,还需要进行大量理论研究和实践工作。随着数字孪生技术日臻完善和航天领域的数字化及智能化发展逐步深入,数字孪生技术将会在航天领域得到进一步广泛应用,更大程度地发挥价值和作用。

参考文献

- [1] LIU Y K, ONG S K, NEE A Y C. State-of-the-art survey on digital twin implementations [J]. *Advances in Manufacturing*, 2022, 10(1): 1-23.
- [2] BARRICELLI B R, CASIRAGHI E, FOGLI D. A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 167653-167671.
- [3] MIHAI S, YAQOUB M, HUNG D V, et al. Digital twins: A survey on enabling technologies, challenges, trends and future prospects [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 24(4): 2255-2291.
- [4] FULLER A, FAN Z, DAY C, et al. Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 108952-108971.
- [5] TAO F, ZHANG H, ZHANG CH Y. Advancements and challenges of digital twins in industry [J]. *Nature Computational Science*, 2024, 4(3): 169-177.
- [6] 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.
- [7] LIU D T, GUO K, WANG B K, et al. Summary and perspective survey on digital twin technology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(11): 1-10.
- [7] 陶飞,戚庆林,张萌,等. 数字孪生及车间实践 [M]. 北京:清华大学出版社, 2021.
- [8] TAO F, QI Q L, ZHANG M, et al. Digital Twin and Its Application in Shop-Floor [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2021.
- [8] GLAESSGEN E H, STARGEL D S. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles [C]. 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2012.
- [9] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems [J]. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*, 2017: 85-113, DOI:10.1007/978-3-319-38756-7_4.
- [10] SONG J S, LE GALL F. Digital Twin Standards, Open Source, and Best Practices [M]. *The Digital Twin*. Cham: Springer International Publishing, 2023: 497-530.
- [11] 全国信息与文献标准化委员会. 信息技术 数字孪生 第一部分:通用要求 [S]. 北京:中国标准出版社, 2023.
- [11] National Committee for Standardization of Information and Literature. Information Technology-Digital Twin-Part 1: General Requirements [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [12] GRIEVES M. Digital Twin: Developing a 21st Century Product Model [M]. Wilmington: Orange Frazer Press, 2020: 197-210.
- [13] 孟松鹤,叶雨玫,杨强,等. 数字孪生及其在航空航天中的应用 [J]. *航空学报*, 2020, 41(9): 6-17.
- [13] MENG S H, YE Y M, YANG Q, et al. Digital twin and its aerospace applications [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(9): 6-17.
- [14] MORRISON J H, AMBUR M Y, BAUER S X. Comprehensive digital transformation NASA langley research center [C]. MIT Meeting, 2016.
- [15] 姜钊,于辉,解晓莉,等. 卫星整星智能制造关键技术及应用 [J]. *航天制造技术*, 2020(6): 63-67.
- [15] JIANG ZH, YU H, XIE X L, et al. Key technology and application of satellite intelligent manufacturing [J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2020(6): 63-67.
- [16] 郭彦江. 洛马发布 2018 年将影响国防和军工的 6 大顶尖技术预测 [N]. *中国航空报*, 2017-12-5(6).

- GUO Y J. Lockheed Martin releases 6 top technology predictions that will affect national defense and military industry in 2018 [N]. China Aviation News, 2017-12-5(6).
- [17] 赵琦, 郭晓燕, 赵源. 数字孪生在卫星星座系统中的应用探索[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(2): 121-128.
- ZHAO Q, GUO X Y, ZHAO Y. Exploration of digital twin application in satellite constellation system [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(2): 121-128.
- [18] AIAA Digital Engineering Integration Committee. Digital twin: Definition & value-an AIAA and AIA position paper [R/OL]. (2021-02-09) [2024-6-10] <https://www.aiaa-aerospace.org/publications/digital-twin-definition-value-an-aiaa-and-aia-position-paper/>.
- [19] 聂蓉梅, 周潇雅, 肖进, 等. 数字孪生技术综述分析与发展展望[J]. 宇航总体技术, 2022, 6(1): 1-6.
- NIE R M, ZHOU X Y, XIAO J, et al. Analysis and perspective on digital twin technology [J]. Astronomical Systems Engineering Technology, 2022, 6(1): 1-6.
- [20] 王建军, 向永清, 何正文. 基于数字孪生的航天器系统工程模型与实现[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1338-1360.
- WANG J J, XIANG Y Q, HE ZH W. Models and implementation of digital twin based spacecraft system engineering [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1338-1360.
- [21] 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 F, LIU W R, ZHANG M, et al. Five-dimension digital twin model and its ten application [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18.
- [22] 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 W R, TAO F, CHENG J F, et al. Digital twin satellite: Concept, key technologies and applications [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(2): 565-588.
- [23] 刘潇翔, 汤亮, 曾海波, 等. 航天控制系统基于数字孪生的智慧设计仿真[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(3): 377-384.
- LIU X X, TANG L, ZENG H B, et al. Smart design and simulation of aerospace control system based on digital twin [J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(3): 377-384.
- [24] 张文杰, 王国新, 朱悉铭, 等. 基于数字孪生的航天电推进器优化设计方法[J]. 宇航学报, 2022, 43(4): 518-527.
- ZHANG W J, WANG G X, ZHU X M, et al. Digital twin-based optimization design method for aerospace electric thruster [J]. Journal of Astronautics, 2022, 43(4): 518-527.
- [25] 刘治钢, 夏宁, 杜青. 航天器供电系统数字伴飞技术应用研究[J]. 航天器工程, 2020, 29(5): 135-141.
- LIU ZH G, XIA N, DU Q. Application research of spacecraft electrical power system digital accompanying flight technology [J]. Spacecraft Engineering, 2020, 29(5): 135-141.
- [26] 戴璐, 邵一夫, 郭宇元, 等. 基于数字孪生的卫星装备智能设计系统[J]. 兵工学报, 2022, 43(S2): 139-145.
- DAI L, SHAO Y F, GUO Y Y, et al. Intelligent design system of satellite equipment based on digital twins [J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(S2): 139-145.
- [27] 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[J]. 宇航总体技术, 2021, 5(2): 7-13.
- WU H, YANG F, WANG B, et al. Study of digital twin based launch vehicle structural design manufacture and validation technology [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021, 5(2): 7-13.
- [28] 王会霞. 数字孪生技术及其在航天控制中的应用研究[C]. 第三十三届中国仿真大会, 2021.
- WANG H X. Research on digital twin technology and its application in aerospace control system [C]. The 33rd China Simulation Conference, 2021.
- [29] 金杰, 夏超, 肖士利, 等. 基于数字孪生的火箭起飞安全系统设计[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1337-1347.
- JIN J, XIA CH, XIAO SH L, et al. Rocket launch safety system design scheme based on digital twins [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1337-1347.
- [30] 郭具涛, 洪海波, 钟珂珂, 等. 基于数字孪生的航天制造车间生产管控方法[J]. 中国机械工程, 2020, 31(7): 808-814.
- GUO J T, HONG H B, ZHONG K K, et al. Production management and control method of aerospace manufacturing workshops based on digital twin [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(7): 808-814.
- [31] 钟珂珂, 洪海波, 沈义平, 等. 孪生技术使能的航天关重件机加车间集成框架研究[J]. 航空制造技术,

- 2021, 64(20): 38-46.
- ZHONG K K, HONG H B, SHEN Y P, et al. Study on digital twin-based integration framework of aerospace key parts machining workshop[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2021, 64(20): 38-46.
- [32] 郭具涛, 戴铮, 钟珂珂, 等. 基于数字孪生的航天产品自适应装调方法研究[J]. *航天制造技术*, 2021(6): 56-60,66.
- GUO J T, DAI ZH, ZHONG K K, et al. Research on adaptive assembly and adjustment method of aerospace products based on digital twin [J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2021(6): 56-60,66.
- [33] 洪海波, 陈锦华, 左丽玲, 等. 基于数字孪生的航天制造车间设备能力评估与动态调度方法[J]. *航天制造技术*, 2022, 3: 12-17.
- HONG H B, CHEN J H, ZUO L L, et al. Digital twin-based equipment capacity evaluation and dynamic scheduling for spacecraft manufacturing shop [J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2022, 3: 12-17.
- [34] 陶飞. 数字孪生工业软件白皮书(2023年第一版)[C]. 第七届数字孪生与智能制造服务学术会议, 2023.
- TAO F. Whitepaper of industrial software for digital twin [C]. *The 7th Academic Conference on Digital Twins and Intelligent Manufacturing Services*, 2023.
- [35] 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 H R, LIU J H, XIONG H, et al. 3D visualization real-time monitoring method for digital twin workshop[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(6): 1432-1443.
- [36] 朱凯, 陈健, 吕桃林, 等. 空间电源数字孪生系统[J]. *上海航天(中英文)*, 2021, 38(3): 197-206.
- ZHU K, CHEN J, LYU T L, et al. Digital twin system for space power-sources [J]. *Aerospace Shanghai (Chinese & English)*, 2021, 38(3): 197-206.
- [37] 庞景月, 赵光权. 数字孪生驱动多算法自适应选择的空电源系统故障检测[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(6): 91-99.
- PANG J Y, ZHAO G Q. Digital twin-driven multi-algorithms adaptive selection for fault detection of space power system[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(6): 91-99.
- [38] SHANG G D, CHEN L, DING J. A digital twin-based approach for the fault diagnosis and health monitoring of a complex satellite system[J]. *Symmetry*, 2020, 12(8): 1307.
- [39] 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[J]. *计算机测量与控制*, 2021, 29(5): 8-14.
- ZAHNG S M, YUE M Y. A rocket health management system for vehicle testing and launching base on digital twin [J]. *Computer Measurement & Control*, 2021, 29(5): 8-14.
- [40] 韩文婷, 程龙, 韩文婧, 等. 数字孪生驱动的火箭控制系统故障诊断研究综述[J]. *计算机测量与控制*, 2022, 30(10): 1-6.
- HAN W T, CHENG L, HAN W J, et al. A summary of the research on fault diagnosis in rocket control system driven by digital twins [J]. *Computer Measurement & Control*, 2022, 30(10): 1-6.
- [41] 张鹏, 袁利, 陈斌, 等. 航天器数字化模拟及应用技术[J]. *宇航学报*, 2023, 44(1): 73-85.
- ZHANG P, YUAN L, CHEN B, et al. Spacecraft digital simulation and application technology [J]. *Journal of Astronautics*, 2023, 44(1): 73-85.
- [42] 袁利, 程铭, 王磊. 航天器飞行控制仿真与平行系统[J]. *宇航学报*, 2021, 42(8): 982-988.
- YUAN L, CHENG M, WANG L. Spacecraft flight control simulation and parallel systems [J]. *Journal of Astronautics*, 2021, 42(8): 982-988.
- [43] 缪远明, 赵辰, 顾荃莹, 等. 硬 X 射线调制望远镜卫星数字伴飞系统设计与应用[J]. *航天器工程*, 2018, 27(5): 46-49.
- MIAO Y M, CHAO CH, GU Q Y, et al. Design and application for HXMT digital companion satellite system [J]. *Spacecraft Engineering*, 2018, 27(5): 46-49.
- [44] 谢洋. 卫星热场感知与姿态控制混合数字孪生建模方法研究[D]. 北京: 军事科学院, 2023.
- XIE Y. Research on hybrid digital twin modeling method for satellite temperature field perception and attitude control [D]. Beijing: Academy of Military Science, 2023.
- [45] 石小林, 王为. 数字空间站建设及其应用[J]. *航天器工程*, 2022, 31(6): 76-85.
- SHI X L, WANG W. Digital space station and its application [J]. *Spacecraft Engineering*, 2022, 31(6): 76-85.
- [46] 邢涛, 孙乐丰, 王为, 等. 数字空间站动力学与控制仿真建模与飞控应用[J]. *空间控制技术与应用*. 2021, 47(5): 40-47.
- XING T, SUN L F, WANG W, et al. Digital space station dynamic and control simulation modeling and flight control application [J]. *Aerospace Control and Application*, 2021, 47(5): 40-47.
- [47] 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[J]. *计算机集成制造系统*, 2021,

- 27(1): 16-33.
- ZHANG W J, WANG G X, YAN Y, et al. Intelligent test of spacecraft based on digital twin and multi-agent systems [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(1): 16-33.
- [48] 侯欣宾. 国际空间太阳能电站领域的最新进展[J]. 国际太空, 2019(4): 39-44.
- HOU X B. The latest progress in the field of international space solar power stations [J]. Space International, 2019(4): 39-44.
- [49] LIU M, XU S W, SU X G, et al. Research status and prospect of space metrology[C]. 2015 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace). IEEE, 2015: 525-529.
- [50] YU H ZH, CH SH H, LIU M. Comparison of distributed space metrology data information transmission technology for space solar power station[C]. 2024 4th URSI Atlantic Radio Science Meeting (AT-RASC). IEEE, 2024: 1-4.
- [51] 刘秀罗, 王佳, 尚国强, 等. 航天发射场数字孪生技术初探[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(S1):

114-119.

LIU X L, WANG J, SHANG G Q, et al. The primary exploration to digital twin technology of launching site[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(S1): 114-119.

作者简介



宋海龙(通信作者),分别在1997年、1999年和2003年于哈尔滨工业大学获得学士、硕士和博士学位,现为北京东方计量测试研究所研究员,主要研究方向为数字孪生、量子计量、电磁学计量、产品开发等。

E-mail:shl_hit@sina.com

Song Hailong (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 1997, 1999, and 2003, respectively. Now he is a professor in Beijing Orient Institute of Measurement and Test. His main research interests include digital twin, quantum metrology, electric-magnetic metrology and product development, etc.