

引用格式：储振航，肖飞，郭建国，等. 数字孪生视角下的空天装备数字化[J]. 航空兵器, 2024, 31(3): 1-13.

Chu Zhenhang, Xiao Fei, Guo Jianguo, et al. Digitization of Space Equipment from the Perspective of Digital Twin[J]. Aero Weaponry, 2024, 31(3): 1-13. (in Chinese)

数字孪生视角下的空天装备数字化

储振航^{1,2}, 肖 飞^{1*}, 郭建国¹, 周 敏¹, 王旭泽¹

(1. 西北工业大学 精确制导与控制研究所, 西安 710102; 2. 西北工业大学 宁波研究院, 宁波 315103)

摘要：本文以数字孪生技术为媒介，从数据、模型和过程三个视角来洞悉数字孪生技术驱动下现代空天装备数字化，并对整个装备数字孪生体的系统组成、特征体系和关键技术进行剖析。然后，本文通过梳理部分空天装备中数字孪生技术的应用，探讨了数字孪生技术在空天装备设计、制造过程中的作用及优势，并分析了数字孪生在未来空天装备领域的应用前景。最后，文章从数据、模型和过程三个层面归纳总结了当前空天装备研发数字化转型建设所面临的困境，以及当前装备数字孪生体发展所面临的主要矛盾，为寻找可能的突破点与解决途径提出了新思路。

关键词：数字孪生；空天装备；装备数字化；特征体系；模型孪生；数据孪生；过程孪生

中图分类号：TJ760; V11

文章编号：1673-5048(2024)03-0001-13

文献标识码：A

DOI：10.12132/ISSN.1673-5048.2024.0001

0 引言

随着信息技术的空前发展，全球迎来了第四次工业革命。数据作为新工业革命下的关键生产要素，催生出一批以数字孪生(Digital Twin, DT)、人工智能、数据科学和物联网为代表的新一代信息技术，形成一股驱动产业变革的新力量。其中，数字孪生作为连接物理世界和数字空间的信息交互技术，以其独特的数字化方式将真实世界中的物理实体映射到虚拟空间，并借助计算机仿真，通过虚实交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段，模拟和预测物理实体在现实环境中的行为方式，实现对复杂物理对象的精细化监测和控制，因此被工业4.0研究院称之为“通用目的技术”(General-Purpose Technologies, GPT)^[1]，数字孪生引发了各国科学家广泛关注，并连续4年被高德纳公司(Gartner)列为世界十大战略科技发展趋势之一^[2]。

本文从数据、模型和过程三个视角探讨数字孪生技术驱动下现代空天装备数字化，介绍了空天装备数字孪生体的发展历程和特征体系，通过梳理数字孪生驱动下装备的快速设计与性能预测、故障诊断与健康管理、智能制造与数字化装配以及任务规划与协同配合多研究领域的国内外研究现状，总结当前空天装备研发数字化转型建设所面临的困境，展望了未来数字孪生在空天装备

中的发展和应用。

1 空天装备数字孪生的概念与内涵

1.1 数字孪生的产生及其在空天装备中的应用发展

孪生的概念起源于美国“阿波罗任务”时代，目的是建造一个与实际飞船等比例大小的地面飞船来模拟和反映实际飞行中飞船的状态，并为飞船的维护提供参考，因此也称为物理伴飞^[3]。而数字孪生的概念最早是由密歇根大学的迈克尔·格里夫斯(Michael Grieves)教授与美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的约翰·维克斯(John Vickers)共同提出的，最初名为“信息镜像模型”(Information Mirroring Model)。2003年，格里夫斯教授在其产品生命周期管理(PLM)中首次引入数字孪生这一概念^[4]。

2010年，NASA在提出的“建模、仿真、信息技术和过程”路线图中，明确了数字孪生的发展愿景，提出将数字孪生技术应用于航天装备维护，以期实现对飞行器飞行系统的健康状况进行故障监测及诊断。美国空军研究实验室结构科学中心也通过将超高保真的飞机虚拟模型与影响飞行的结构偏差和温度计算模型相结合，开展了基于数字孪生的飞机结构寿命预测^[1]。与此同时，洛克希德·马丁公司、诺斯罗普·格鲁曼公司、空客公司等

收稿日期：2024-01-02

基金项目：国家自然科学基金项目(62003270)

作者简介：储振航(2000-)，男，陕西商洛人，硕士研究生。

*通信作者：肖飞(1983-)，女，湖南益阳人，博士，副教授，硕士生导师。



免费获取电子版

也积极推进数字孪生技术的实际应用，涉及武器装备系统的设计研发、生产制造、运行维护等多个应用方向^[5-6]。

以美国空军的 F-35 战斗机为例，2016 年诺斯罗普·格鲁曼公司利用数字孪生技术改进了 F-35 机身生产中劣质品的处理流程，实现零部件数据的自动采集，并精准映射到数字孪生模型，进行实时、快速、精确分析，使 F-35 战斗机进气道加工缺陷决策处理时间缩短了 33%。2017 年洛克希德·马丁公司又在 F-35 沃斯堡工厂部署了基于数字孪生技术的“智能空间平台”，将实际生产数据映射到数字孪生模型中，并与制造执行和规划系统相连，进行提前规划和调配制造资源，从而全面优化生产过程，使 F-35A 战斗机的制造成本从 9 460 万美元降低到 8 500 万美元以下，降幅超过 10%。达索航空公司也基于数字孪生理念建立了虚拟开发与仿真平台，

用于“阵风”系列战斗机和“隼”系列公务机的设计过程改进，最终实现设计成本降低 25%，且首次质量改进提升 15% 以上^[1, 3, 5]。

1.2 空天装备数字孪生体的系统组成

数字孪生驱动下的现代空天装备数字化，其核心就是紧密围绕如何基于数字孪生技术实现装备设计、制造与维护全流程数字化，即如何构建可镜像空天装备全生命周期的数字孪生体，以提高现有空天装备的智能化、数字化水平。因数字孪生是以数据为基础，模型为核心，过程为纽带，就从数据、模型和过程三个角度归纳提出空天装备数字孪生体的系统组成，即空天装备的数字孪生体按组成为数据孪生、模型孪生和过程孪生，具体示意如图 1 所示^[7]。上述问题也就随之转变为如何完成空天装备设计、制造和运维过程的数据孪生、模型孪生和过程孪生。

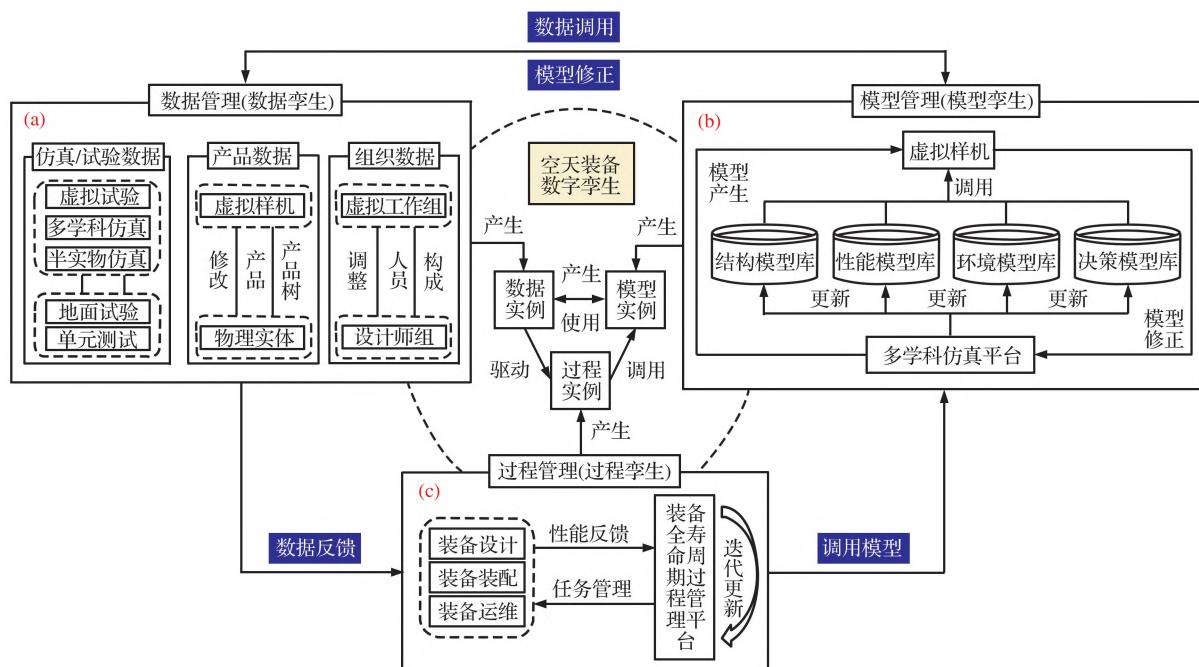


图 1 空天装备数字孪生体的系统组成及运行过程^[7]

Fig. 1 System composition and operation process of digital twins for space equipment^[7]

数据孪生主要完成对孪生数据的产生、储存与管理，并实现相关数据采集处理及分析，对应如图 1(a)；模型孪生主要基于多学科仿真平台完成孪生模型的构建与多层次孪生模型的管理，包含装备实体的几何模型、物理模型和数据统计模型等，对应如图 1(b)；过程孪生则是通过构建装备全寿命周期的过程管理平台，完成装备全寿命的任务监督和过程管理，包含运行过程模拟、故障诊断与预测、优化与决策支持等，对应如图 1(c)。这三部分相互交互、协调整合为一个完整的空天装备数字孪生体，完整覆盖空天装备的设计、运维和决策管理。通过构建装备的数字孪生体，实现对其性能仿真和实体装备的全生命周期管理（包含数据管理、模型管理和过程管理），并通过数据反馈、模型调用，推动装备实体产品和虚拟模型的不断迭代更新和优化^[8-9]。

1.3 空天装备数字孪生体的特征体系

针对空天装备数字孪生体的特征，本节从数字孪生的模型、过程和数据三个大类来进行特征梳理和解释，构建起以模型特征、过程特征和数据特征为核心的特征体系。

1.3.1 模型特征

模型类特征包含装备实体的功能模型（Functional Model）、物理模型（Physical Model）、行为模型（Behavioral Model）、系统的控制模型（Control Model）以及模型测试与验证（Model Test and Verification）。

功能模型作为模型孪生的基础，描述了实体系统的各个功能特性及其之间的关系。通过建立实体物理系统的功能模型，实现了对实体系统的精确映射；物理模型详细描述装备实体的结构、材料、力学行为等的实体物

理特征, 更好地模拟实体系统的运行情况, 理解实体系统的物理特性; 根据装备实体建立起实体系统的行为模型, 可模拟实体装备系统在不同条件下的行为及运行情况, 能够准确模拟和分析实体系统的行为, 更好地了解实体系统的动态特性, 实现实体装备的性能预测、故障诊断和维修需求判定等; 实体装备系统的控制模型, 可实现对实体系统的远程监控和控制。控制模型可以通过调整实体系统的控制参数, 优化系统的性能, 也可以通过远程监控对控制实体系统进行实时调整, 从而提高了整个系统的灵活性和可控性。当完成所有模型的构建与调试后, 就需要对这些模型进行测试与验证。空天装备的数字孪生体需要测试和验证建立的模型与实体系统的一致性和准确性, 确保数字孪生体可以准确地模拟实体系统的运行情况^[10]。

1.3.2 过程特征

过程类特征包括装备系统的状态监测与诊断(State Monitoring and Diagnosis)、故障检测与预测(Fault Detection and Prediction)以及优化与决策支持(Optimization and Decision Support)。

状态监测与诊断能够实时监测实体系统的运行状态, 并通过分析传感器测量所得的数据来诊断系统的故障和异常, 及时发现和解决实体装备中的问题, 从而提高系统的可靠性和可用性; 故障检测与预测是通过分析实体系统的运行情况来检测系统的故障, 并预测故障可能的发生位置、频率、损坏程度等, 实现装备的故障预防和维修规划, 减少系统故障给装备生产和使用过程带来的损失; 优化与决策支持则通过分析装备实体及系统运行过程中的数据和模拟结果, 提供优化和决策支持, 帮助制定最佳的运行策略和决策方案, 提高整个装备系统的效率和性能^[10]。

1.3.3 数据特征

数据类特征包括数据采集与传输(Data Acquisition and Transfer)、大数据处理(Big Data Processing)、数据集成与共享(Data Integration and Sharing)、数据安全与隐私(Data Security and Privacy)以及可视化与交互(Visualization and Interaction)。

数据采集与传输是通过采集实体装备和模拟系统中的各种传感器数据和测试数据, 并将这些数据传输到装备孪生平台进行处理和分析的过程。这些数据作为装备数据孪生的核心, 为后续的分析和应用提供数据支持。大数据处理是装备数字孪生中的重要环节, 通过对采集到的大量传感器数据和性能测试数据进行处理和分析, 可以发现系统的隐藏规律。通过数据处理操作(包含数据清洗、融合、挖掘分析等), 得到一批标准化实体和孪生数据, 以方便后续提取有价值的信息。数据集成与共享能够帮助进行全面的数据分析和决策, 提高工作效率和协同性。通过整合来自不同数据源的数据, 并与其他相关的系统共享数据, 实现信息的交流和共享。数据安全与隐私指在整个装备孪生过程中需要保护传感器数据的安全性和隐私性, 防止数据被未经授权的访问和使用。

可视化与交互指通过将数据转化为图形化的界面, 可以帮助用户更加直观地理解和分析数据, 实现新方式的信息交互^[10]。

在模型特征方面, 空天装备的数字孪生体通过不同的模型(包含功能模型、物理模型、行为模型和控制模型等)描述装备实体的特征和关系, 并通过模型的测试与验证来确保模型的一致性与准确性; 在过程特征方面, 空天装备的数字孪生体通过对装备全寿命周期内的状态检测, 实现装备故障的实时预测, 并为空天装备的维修提供优化和决策建议; 在数据特征方面, 空天装备的数字孪生体通过对数据的标准化采集、传输、处理、集成、共享、安全保护及可视化交互, 实现了装备研制、运维过程的标准化和数字化。

2 空天装备数字孪生关键技术

数字孪生技术与传统空天装备结合, 推动了装备设计、仿真、试验评估、故障诊断和使用维护技术的数字化发展。数字孪生技术在有效提高空天装备可靠性和可用性的同时, 更好地支持空天装备的维护和管理工作, 从而大幅提升装备的智能化和信息化水平, 实现了由传统卫星、火箭、导弹向数字卫星^[11]、数字火箭、数字导弹的跨越式发展^[12]。图2从数据、模型和过程三个角度梳理论证空天装备数字孪生关键技术。

2.1 过程孪生技术

所谓过程孪生, 就是指数字孪生技术在装备设计、制造和运维过程等特定应用领域中的扩展, 专注于构建特定流程或操作的精确数字模型, 能够实时模拟物理过程, 提供关键性能数据和操作反馈, 从而在决策制定、效率提升以及安全性增强方面发挥作用。其主要包括过程全流程规划管理、自适应闭环控制等。在空天装备等领域中, 主要应用于装备总体设计、细节设计、制造及航天器在轨设计等方面^[13]。过程孪生通过模拟真实世界的操作流程, 在不干扰实际设备的前提下, 实时监测装备工作状态、预测潜在故障, 提供新操作方案的测试和流程优化机会, 优化运行策略。

2.1.1 全流程规划管理

流程规划是一种系统的策略性方法, 目的是优化工作流程以达成特定目标, 主要涉及对任务的识别、分析以及确定任务执行的最佳顺序, 因此选择合适的工具和技术并有效地规划资源分配, 就成为全流程规划管理的核心。这在装备设计、制造和运维过程中体现得更加明显, 即如何在把控操作效率的同时进行成本(制造成本、时间成本等)的节约和对装备质量的控制, 因此, 整个流程规划过程要求对装备全生命周期的相关流程进行深入的分析, 考虑流程设计、实施和监控的多个方面, 做好流程规划是确保项目设计的成功和可持续改进的基石。全流程规划可应用于航空航天工业零件的制造, 通过构造的信息模型并结合制造过程中涉及的相关信息和数据的属性和关系, 利用产生的规划规范偏差等信息提前进行有针对性的改进, 以保证加工过程的质量和成本的双重优化^[14]。

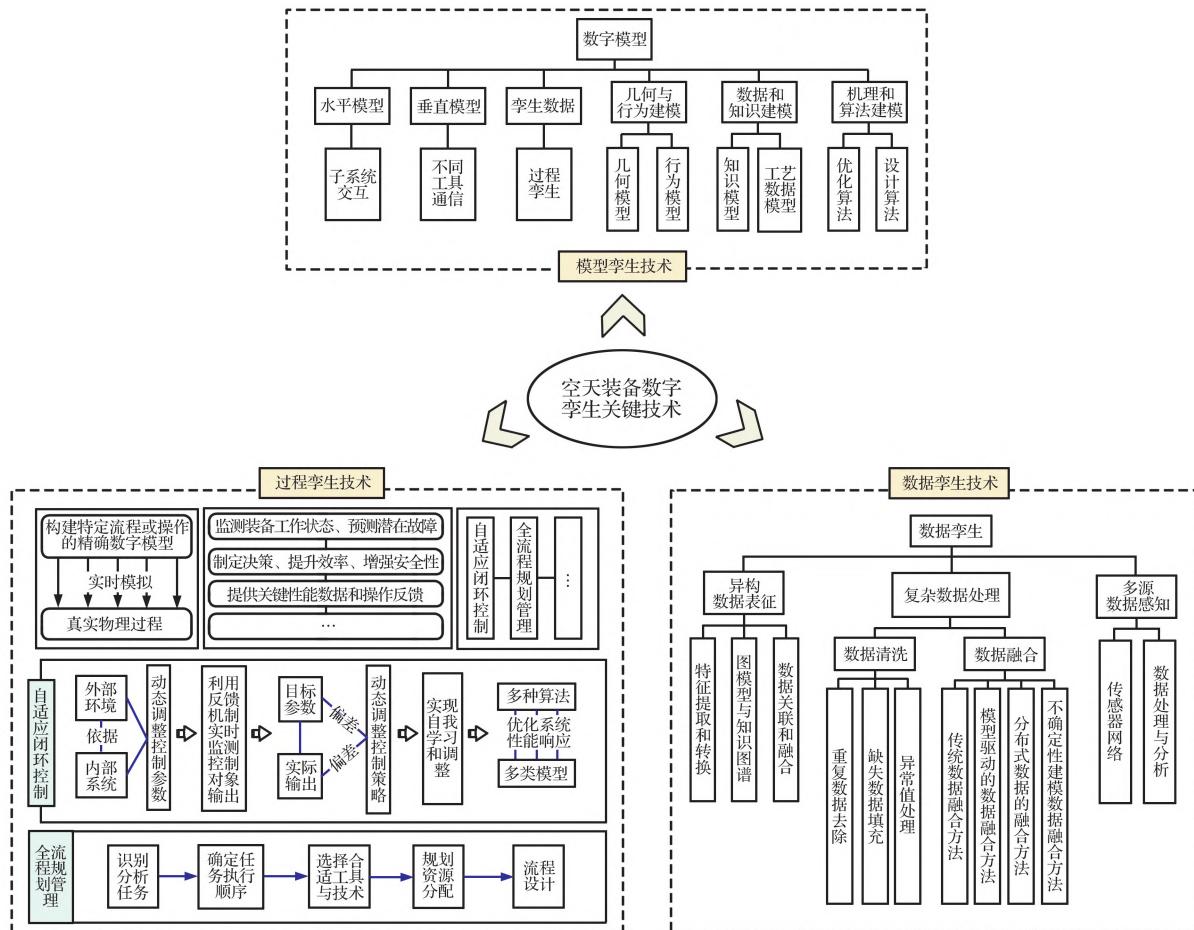


图2 空天装备数字孪生关键技术示意图

Fig. 2 Schematic diagram of key technologies of digital twins for space equipment

2.1.2 自适应闭环控制

自适应闭环控制是一种先进的控制策略，它基于控制理论和现代信号处理技术，能够根据外部环境变化和系统内部动态自动调整其控制参数。这种系统利用反馈机制，实时监测控制对象的输出，进而基于设定目标与实际输出之间的偏差动态调整控制策略。在装备的全生命过程中该方法也同样适用。针对装备设计、制造和维护过程中的参数可随时间演变及系统复杂且无法完全预知的问题，自适应闭环控制系统能够实现自我学习和调整，以适应整个流程随时间不断变化的环境条件，从而确保整个过程的高效和稳定运行，同时整个闭环控制还可以优化系统性能和响应能力。在实现这些功能的过程中，其通常结合了多种算法和模型，如自适应算法、预测模型和优化策略等。在空天装备领域中，其常用于航天器电液伺服系统^[15]及小推力航天器自适应闭环机动规划^[16]等控制系统中。

2.2 模型孪生技术

模型孪生技术被定义为实体装备产品的所有部件、特征和细节的完全高保真虚拟再现，使设计师能够通过运行基于这些数字模型的仿真来测试整个系统的行为，并预测真实装备的响应。每个系统/部件的数字模型都需要无缝连接，这种一体化意味着从两个不同方向定义模

型之间的联系：“水平”模型，它包含了在整个体系结构中使用相同仿真方法模型的集成，这是由子系统模型之间的交互产生的；“垂直”模型，包括在不同工具中开发的模型之间的通信，这通常与实现更高层次的产品模型细节的需要相一致^[17]。模型之间通过数字孪生数据进行交互，而模型的演化及不同领域模型间的关系则通过过程孪生得到体现。

2.2.1 几何与行为建模

数字孪生模型通常包括对实体的几何形状和行为特性建模。几何建模关注如何精确地描述实体的形状、结构和尺寸，而行为建模涉及对装备实体的运动、力学特性、传热传质等行为进行建模。

(1) 几何模型

几何模型孪生主要源于物理和虚拟样机。虚拟样机的产品树准确展现物理样机的部件和结构关系。设计人员可以在虚拟样机上进行设计调整，然后通过数字孪生系统的接口将这些更改传递到物理样机，以指导其加工和制造过程^[17]。

(2) 行为模型

行为模型是指模拟和表示一个物理对象或系统行为的数字模型。这种模型能够精确捕捉并反映其对应的实体在各种条件和环境下的行为和响应。行为模型通常包

括对物理系统的运动学、动力学、控制逻辑和其他相关特性的详细描述。通过这样的模型,可以在虚拟环境中准确预测和分析实体的性能,从而对系统进行优化和改进,或者用于培训和决策支持。

2.2.2 数据和知识模型

数字孪生模型需要使用大量的数据进行建模和分析。数据模型用于整合、管理和处理各种传感器数据、监测数据和操作数据,以提供实时监测和预测能力。知识模型则整合了领域知识、规则和经验,以补充数据模型的不足之处。

(1) 工艺数据模型

工艺数据模型孪生主要关注工艺数据与装备性能数据之间的关联,涉及工艺误差、约束和成本等模型。制造过程的反馈将这些工艺数据投射到数字孪生体中。随后,这些信息用于更新学科仿真中的工艺模型。更新后的模型用于模拟装备性能和行为,进而引导装备设计和工艺方案的优化^[17]。

(2) 知识模型

知识模型代表了对数据的一种高级理解和抽象化。它不仅关注数据本身,而且关注数据背后的含义、模式和关系。通过对数据进行分析和解释,知识模型能够将原始数据转化为有用的知识,从而为决策提供支持。其中包含对数据的深入理解,如数据之间的关系、数据背后的原理以及如何应用这些数据来解决实际问题,由此延伸出有形应用模型,如基于知识工程的装备总体设计先进技术^[18]。

2.2.3 机理和算法模型

数字孪生模型中的机理和算法模型用于描述和模拟装备的运行原理和行为机制。通常是基于物理原理、数学方程、统计模型等,解释和预测系统的动态性能和行为。这些模型可用于分析故障、优化设计、改进运营等。算法模型可分为设计算法和优化算法两类,具体可涉及大数据, AI – ML, IoT, CPS, 边缘计算, 云计算, 通信技术等^[19]。算法模型主要用于在虚拟空间建立对航空航天装备的方案选择、设计及优化。

(1) 设计算法

计算流体动力学(CFD)算法是用于模拟和分析流体(气体和液体)行为。它通过数值分析和数据结构来解决和分析涉及流体流动的问题,如空气动力学和水动力学。CFD 算法通过解决 Navier – Stokes 方程(描述流体运动的方程)来模拟流体流动、传热、质量传输等现象。

有限元分析 FEA 算法用于预测物体如何对外部力、振动、热和其他物理效应做出反映。FEA 通过将复杂的结构划分为较小的、更易于管理的单位,称为“有限元”,然后对这些单位进行数学运算来模拟整个系统的行为。

(2) 优化算法

在进行数字孪生模型的优化过程中,可以使用遗传算法、粒子群优化算法^[20]、拓扑优化、人工神经网络算法、基于动态规划的方法、基于模型预测控制的方法和其他增强版本^[21]、Apriori 算法^[22]等一种或多种优化算

法,以达到提升模型精度、提高仿真效率的目的。

例如,在解决航空航天应用中复杂热流体设备设计的拓扑优化问题时,面临的主要挑战是极其复杂的流体动力学、传热与形状之间非线性耦合关系和拓扑优化算法分析产生的几何形状,为此, Mekki 等^[23]提出了一种结合计算流体动力学(CFD)的新型基于拓扑优化的遗传算法(GA),用于优化热交换器中的翅片形状,实现了相同机械强度的前提下,最大限度地减少材料使用。

2.3 数据孪生技术

所谓的数据孪生旨在对现代空天装备设计过程中所涉及的各类结构、材料、人员组织、行为、性能、工艺等信息在虚拟空间中进行完全映射,是空天装备数字孪生体在数据层面实现的虚实一致。实现数据孪生是构建装备数字孪生体的基础,也是装备数字化设计的基础。

2.3.1 多源数据感知

多源数据通常是指来自不同传感器、设备、系统或数据源的数据,这些数据来源可能具有不同的数据类型、数据结构和数据特征。多源数据感知是数据孪生技术的重要组成部分,它涉及从不同的数据源中收集和感知各种类型的数据,为孪生模型提供全面的输入。多源数据感知的目的是准确、高效地获取来自不同来源和传感器的数据,整合不同数据源的信息,从而提高分析和决策的准确性,以获得对实体系统行为的全面理解,通常是在装备实体上利用多类型的传感器网络进行数据采集。

传感器网络作为一种常用的多源数据感知技术,可利用分布式的传感器节点通过无线通信方式收集实时数据,也可以将传感器网络部署在装备实体系统的不同位置,以收集各种环境参数、状态信息和性能指标等数据。通过合理布置传感器节点,可以实现对整个实体的全面监测和数据感知。

在后续的信息处理和分析中,将综合利用来自多个不同源头的数据,以获取更全面、准确和可靠的信息。如选择合适的数据处理和分析方法,关联和融合不同数据源信息,并针对这些数据进行质量评估和可信度分析。

2.3.2 异构数据表征

异构数据表征是指将不同类型、结构和来源的数据进行一致和有效的表示和描述的过程。异构数据通常包括结构化数据、半结构化数据和非结构化数据,如文本、图像、视频、传感器数据等。在空天装备领域,通常包含多学科数据、不同维度数据、图像数据及文本数据等,异构数据表征的目的是将异构数据转换为统一的数据形式,以方便后续数据分析、挖掘和机器学习等任务的进行。

常见的异构数据表征方法包括以下几种:①针对不同类型的数据,可以采用特定的特征提取和转换方法,将其转化为统一的特征表示。在空天装备领域,可以应用信号处理、图像处理、自然语言处理等技术,提取对应的时频特征、视觉特征、文本特征等。②图模型与知识图谱。图模型是一种有效的方式,用于表示与建模异构数据之间的关系。通过构建图结构,可以将传感器、设备、装备以及它们之间的关联关系表示为图中的节点和边。

知识图谱则是一种用于表示和存储该领域知识的结构，可以与异构数据进行关联，提供更丰富的语义信息。③异构数据往往来自不同的源头，包括传感器、设备、系统等。数据关联是指将来自不同源头的数据进行连接和关联，以获取更全面和准确的信息。数据融合是将异构数据整合成一致的数据表示，通过数据关联、冲突解决等技术来提供一致性和完整性的数据。

2.3.3 复杂数据处理

针对大批量、高维度、多复杂度的数据处理，通常会集中于数据清洗、数据融合等方面，从而为后期的数据挖掘及分析提供一批标准化数据集。

(1) 数据清洗

作为数据预处理过程中的重要环节，数据清洗通常用于检测和纠正数据中的异常值和噪声，以提高数据质量。数据清洗操作通常包括去除重复数据、缺失数据填充和异常值处理。

去除重复数据可以避免重复数据偏重过大导致的计算偏差和对分析结果的影响，也可以减少数据冗余从而提高数据质量。常见的方法包含：①基于基准属性。根据一个或多个基准属性(如发动机的尺寸、药柱厚度等)来检测和删除重复数据。②基于相似度匹配。使用相似度量方法来进行数据匹配和去重，如编辑距离、余弦相似度或 Jaccard 相似度。③基于规则或模式匹配。利用事先定义的规则或模式来匹配和剔除部分重复数据^[24]。

缺失数据填充可以保持数据完整性，避免信息丢失从而减少数据偏差，提高数据分析和建模的准确性和可靠性。缺失数据处理通常有单一插补法(Single Imputation)、回归方法(Regression – Based Imputation)、EM 算法(Expectation – Maximization Algorithm)、多重插补法(Multiple Imputation)及基于机器学习的填补方法等。单一插补法通常指根据已有数据的统计特征来估计缺失值，通过使用一个单一的值来替代缺失值，常见的插补方法包括均值插补、中位数插补和最近邻插补等；回归方法是指利用已有数据的特征与目标变量之间的线性或非线性关系，通过建立回归模型来预测缺失值；EM 算法是通过暂时对缺失值进行估计，然后使用这些估计值来更新模型参数，并不断迭代直到收敛，同时估计缺失值的分布；多重插补法可通过多次生成缺失值的估计，利用每次生成的估计结果的方差来获得更准确的缺失值估计。常用方法如 MICE (Multiple Imputation by Chained Equations)、KNN(K – Nearest Neighbors)等；基于机器学习的填补方法，通常是利用已有数据的特征和样本之间的关系，通过训练模型来预测和填补缺失值，常见的方法包括决策树、支持向量机、随机森林等^[25]。

异常值处理可以防止异常值对统计分析和机器学习模型的误导，保证数据可靠性和准确性，从而提高模型性能。常见的数据的异常值剔除方法有：①基于阈值方法。使用统计指标(如均值加减标准差)或基于百分位数(如箱线图)来识别和删除超过特定阈值的数据点。②基

于聚类或离群点检测算法。利用聚类算法或离群点检测算法(如 LOF 或 Isolation Forest)来识别和处理异常值。③基于机器学习模型。通过训练机器学习模型，如异常检测模型或异常分数模型，来识别和处理异常值^[26]。

(2) 数据融合

数据融合作为数据孪生过程中的关键过程，涉及将来自多个采样源的数据整合和信息集成^[27]，提供更全面和准确的数据来方便后续的结果分析。

数据融合方法大致可分为：①传统数据融合方法，包含加权平均法(将多个数据源的观测值按照一定权重进行加权平均)、最大值法和最小值法(将多个数据源的观测值分别选取最大值或最小值作为融合结果)、平均值法(将多个数据源的观测值求平均作为融合结果)、中值法(将多个数据源的观测值排序后选择中间值作为融合结果)以及加权求和法(将多个数据源的观测值按照一定权重进行加权求和)。②基于模型驱动的数据融合方法。a. 基于统计模型。利用统计模型，如贝叶斯网络、隐马尔可夫模型等，对不同数据源的概率分布进行建模和融合。b. 基于机器学习算法。使用机器学习算法，如决策树、支持向量机、神经网络等，对多个数据源的观测值进行学习和融合。c. 基于深度学习模型。利用深度学习模型，如深度神经网络、卷积神经网络，对多个数据源的特征进行学习和融合。③分布式数据融合方法。a. 基于合作感知的方法。通过合作感知和信息共享，分布式节点之间协同融合各自的数据，如分布式传感器网络中的数据融合。b. 基于分布式优化的方法。将数据融合问题转化为分布式优化问题，在各个节点进行局部优化后，通过通信和协作，融合得到全局最优解。c. 基于联邦学习的方法。利用联邦学习的思想，将模型的训练过程分布在不同节点上进行，通过参数传递和更新，实现数据融合与模型训练^[28]。④不确定性建模的数据融合方法。a. 基于概率论的方法。使用概率论框架，如贝叶斯推理、概率图模型等，对不同数据源的不确定性进行建模和融合。b. 基于模糊逻辑的方法。利用模糊逻辑理论，考虑模糊和不确定性的信息，在多个数据源的观测值之间进行模糊规则的推理和融合^[29–30]。

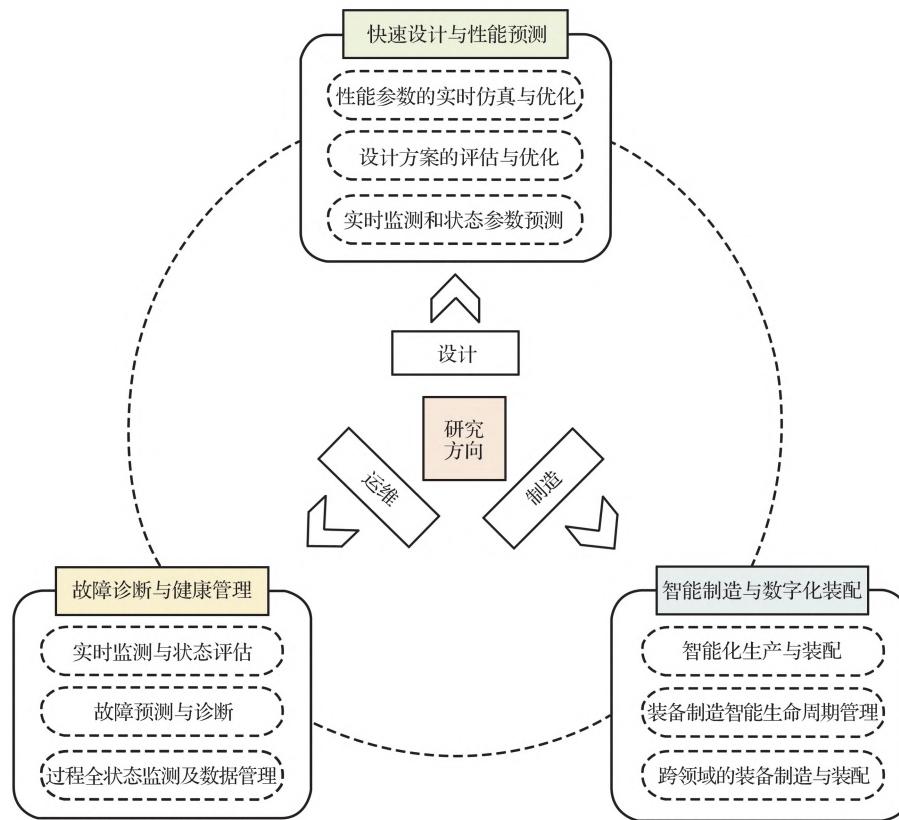
3 机遇与挑战

数字孪生技术的引入，从数据、模型和过程三个视角重构了航空航天装备全寿命周期的各个阶段，加速了航空航天装备设计进程，颠覆了装备传统运维模式，提升了装备加工制造的智能化水平。

本节将联系之前提出的模型、数据及过程三要素，多角度分析数字孪生驱动下的空天装备在设计、制造、运维及特定装备在任务执行中所面临的挑战以及未来的研究应用。未来具体的研究方向如图 3 所示。

3.1 “数据 + 模型”驱动下的快速设计与性能预测

不同于传统经验法设计，基于数字孪生的空天装备设计指的是利用处理后的标准化数据和相关的物理学原

图 3 空天装备数字孪生体未来的研究方向^[9]Fig. 3 Future research direction of space equipment digital twins^[9]

理、模拟实验来构建能够准确描述飞行器的结构、特性和性能参数的装备孪生模型，通过建立的孪生模型反馈数据，实现对装备关键性能的实时仿真和参数优化，因此，其本质上就是“数据+模型”驱动下的空天装备快速设计与性能预测。

这种基于数据和模型驱动下的新型装备设计方法在加快空天装备设计过程的同时，也提高了装备性能预测的准确性。整个设计过程不仅可评估装备某些关键参数对其最终性能的影响，也可以对不同的设计方案和参数组合进行仿真和预测，通过孪生模型快速预测不同设计方案和参数组合的性能结果，并进行实时对比和评估，快速迭代和优化设计方案，以提高装备设计的效率和准确性。同时，通过将实时传感器数据与数字孪生模型整合，可实时监测飞行器的装备性能并预测其下一步的状态参数，从而方便准确地评估装备的性能和健康状况，再将建立的装备数字孪生模型通过与实际装备的实时数据交互，将模型数据与实际装备数据进行实时对比和校准，就可以提供更加准确的装备状态评估和性能预测结果。孪生模型也能够模拟装备在不同工况下的运行状态，预测装备的性能指标，寻找最优性能指标下的装备设计方案，从而帮助工程师在设计和制造过程中迅速评估装备性能，指导优化设计和改进制造过程^[31~32]。

现有的研究主要集中于以下方面。在火箭的数字化设计方面，文献[33]提出了基于数字孪生的火箭结构设计制造与验证技术，增加了面向过程的虚拟映射、模型

驱动和数字管理等关键要素，优化了传统的火箭经验设计方式，大大提高了火箭的设计与制造的效率；在分系统设计领域，为解决发动机设计与仿真分离等难题，文献[9]提出了数字孪生驱动的固体发动机总体设计概念体系；在卫星领域中，文献[34]提出了一种基于数字孪生的卫星装备智能设计方法，解决了卫星装备设计数据库标准化程度低、数据可继承性差、覆盖率低等问题，提高了卫星装备设计效率，缩短了研制周期，降低了研制成本；在无人机设计领域，针对大型军用无人机的设计、制造的现实问题，文献[35]提出了基于云计算的军用大型无人机设计、制造的数字孪生框架，同时针对无人机需求日益增加但设计效率低的问题，文献[36]提出了用于无人机推进设计的数字孪生系统，配备了弹道规划和可视化分析组件，以帮助有效地评估无人机推进设计，方便用户探索不同的推进配置如何影响轨迹的问题，文献[37]针对四轴飞行器性能预测问题，提出构建四轴飞行器的数字孪生体框架来预测其性能参数，如最大航程和续航时间等。

综上，数字孪生驱动下的空天装备快速设计与性能预测利用数字孪生技术、快速设计方法和性能预测算法，实现空天装备设计和性能预测的高效和准确，核心在于“数据+模型”的双驱动。未来的研究方向包括进一步结合机器学习和数据挖掘技术以增强性能预测的准确性和精确度，提高装备模型的精准度和智能化以及实现装备

设计过程的孪生。

3.2 “数据+模型”驱动下的故障诊断与健康管理

数字孪生在现代空天装备的故障诊断与健康管理方面起着重要作用，通过数字孪生技术，可以将实时数据和装备的数字模型整合起来，实现对装备状态的实时监测和评估，因此其核心依然在于“数据+模型”的双驱动。装备的孪生模型不仅可以准确描述装备的结构、特性和性能参数，还可以根据实时数据进行更新，以反映装备的当前状态，为后续的故障预测与诊断提供更加稳定的信息来源。同时，通过对孪生模型与实际装备的实时数据对比，可检测到装备出现的异常信号和行为，从而帮助研究人员进一步确认装备的故障异常和维修状况。孪生模型也可以根据历史数据和故障经验，识别并预测潜在的故障模式，还可以根据模型提供的预测，提前采取相应的预防措施或及时进行维护和修复，从而避免装备故障和停机。建立准确的装备数字模型，不仅可以对装备运行过程进行实时性能监测和评估，还能够在装备后期的贮存过程中实时检测装备的性能下降或健康状况的变化情况，实现装备的全生命期周期健康管理，也可以对不同的贮存环境进行仿真和模拟，评估其对装备后期性能的影响，同时反馈于装备最开始的设计阶段。基于“数据+模型”的优化设计也可以帮助提高装备的性能和效率，减少故障和维修的风险。模型和装备的实时数据交互和模型迭代，对装备状态进行监测、分析和预测，从而实现故障诊断和健康管理，提高装备的可靠性、安全性^[38]。

文献[39]基于数字孪生技术建立了火箭起飞安全系统方案，通过数字化仿真，实现了火箭起飞过程仿真、干涉检查和安全性分析，为火箭安全起飞提供保障。针对火箭发射过程中的故障预测与健康管理，文献[40]通过建立运载火箭测试与发射阶段的数字孪生模型，依托模型实现了对运载火箭健康管理功能的设计和优化，支持火箭测试过程的数据分析、飞行过程协同诊断、故障处理决策支持等功能。针对同型号火箭控制系统测发数据少、故障样本不足的问题，文献[41]提出了数字孪生驱动下的火箭控制系统健康管理框架，通过模拟仿真解决了火箭控制系统故障诊断问题，实现了数据驱动下的智能诊断和故障挖掘。在火箭的性能监测和维护方面，文献[42]基于有限元方法进行了孪生体模型搭建研究，提出了运输环境下的火箭性能故障诊断方法，为产品状态监控、健康管理等有效决策奠定了基础。针对压电振动传感器的剩余寿命预测，文献[43]通过建立感知特性退化模型，结合实时监测数据，模拟和预测传感器的灵敏度退化情况，从而预测传感器的剩余寿命，提前进行维护和更换，以保证装备的正常运行。针对装备的全过程状态监测，文献[44]基于多类软件构建了一种新型的多旋翼无人机数字孪生仿真平台，实现了对多旋翼无人机的全生命周期进行仿真和跟踪。针对无人机状态监测问题，文献[45]从无人机的物理实体、数字孪生体与数据信息等方面出发，构建了一种实时数据驱动的无人机数

字孪生模型，实现了对无人机状态的实时监测。为了满足无人机在实际飞行过程中的虚实交互、实时响应和精确控制等要求，文献[46]基于数字孪生技术搭建了四旋翼无人机飞行数字孪生系统平台，对其飞行过程进行仿真研究。综上，“数据+模型”驱动下的空天装备故障诊断与健康管理利用数字孪生技术多途径算法，实现对装备故障的实时诊断和健康状态的监测与管理。未来的研究方向包括进一步提高故障诊断与健康管理算法的准确性和可靠性、优化数字孪生模型的建立和更新方法，以及整个故障维修过程的全状态监测及数据管理。

3.3 “模型+过程”驱动下的智能制造与数字化装配

数字孪生驱动下的空天装备智能制造与数字化装配是利用数字孪生技术，将现代空天装备制造与装配过程中的数据、模型和算法相结合，实现空天装备制造和装配的智能化和数字化。整个过程的模型涉及装配制造模型的构造及全过程孪生模型的构造，智能制造与数字化装配的核心在于制造装配模型构建以及实现整个装配过程的孪生，因此属于“模型+过程”的双驱动。首先，数字孪生技术可以在空天装备制造中实现智能化生产。通过与装备数字模型实时交互，监测制造过程中的各项参数和指标，包括机械加工、装备组装等的实时状态。孪生模型可以与实际装备进行对比和校准，帮助操作人员及时调整生产过程，提高生产效率和质量。其次，针对装备的装配过程，通过建立装备的数字孪生模型，可以进行装配过程的仿真和优化，预测装配过程中可能出现的问题，并提供相应的解决方案。数字孪生模型可以实时与实际装配过程进行对比，监测装配质量，并提供修正建议，以确保装备的正确组装和优化装配。最后是空天装备的智能化生命周期管理，通过建立装备的数字孪生模型，可以实现装备的全生命周期管理，包括设计、制造、使用和维护等各个阶段。数字孪生模型可以帮助实现装备的故障诊断、预测维护和智能化支持，提升装备的可靠性和可维护性^[30, 47]。

现代空天装备智能制造与数字化装配涵盖了众多研究领域，包括机械加工、可持续制造、质量管理、安全关键系统集成等。文献[22, 30]针对空天装备的机械加工问题，提出利用数字孪生技术构建模型模拟加工过程，从而优化工艺参数，提高加工效率和质量。文献[48]提出基于仿生学的空天零部件数字孪生建模方法，该方法可预测加工过程中带来的变形和损伤，描述零部组件的结构和性能特性，进而进行质量控制和优化。针对空天装备领域内的可持续智能制造，文献[49–50]提出基于数字孪生对装备的整个生命周期进行模拟，包括设计、制造、使用和回收过程，从而助力资源的高效利用和环境的可持续发展。文献[22]针对装备装配过程中的质量问题，提出利用数字孪生模型实时监测装配过程中的质量情况，并结合灰色–马尔可夫模型和 Apriori 算法等进行装配质量预测和优化。文献[51]提出将数字孪生应用于飞机装配的机电一体化系统中，以确保装配过程的安全高效。针对智能制造领域人工巡视效率低、精确度低、

危险系数较高等问题, 文献[52]提出一种基于数字孪生的无人机巡航系统, 增加了部件设备维护的透明度, 并且让“全生命周期管理”变成可能。

综上, “模型+过程”驱动下的空天装备智能制造与数字化装配将数字孪生技术应用于空天装备的制造和装配过程中, 通过提供模拟、预测和优化的能力, 推动航天装备制造和装配的创新发展, 实现装备生产的智能化和数字化。未来的研究方向包括进一步改进模型算法, 提高装备制造和装配过程的准确性、实时性和装配数据的采集、传输及处理。

3.4 “模型+过程”驱动下的任务规划及协同配合

相比于火箭、导弹等其他空天装备, 无人机的数字孪生除了聚焦于传统的设计、制造及运维以外, 还包括数字孪生驱动下的任务规划及协同配合, 涉及无人机群的协作配合、战场任务执行、编队飞行模拟、监管及通信^[53]等。对于军用无人机来讲, 为实现对目标的及时侦察、精确定位和完美打击, 除了自身的结构模型孪生外, 还应当包含当前环境模型孪生以及整个任务过程的孪生模型构建, 因此整个过程就变成了“模型+过程”驱动下的任务规划及协同配合。

群集运动是多无人机系统基本而关键的操作, 因为无人机之间往往需要进行深度协作以做出最优决策。文献[54]针对无人机之间的任务分配问题, 基于数字孪生技术构建了无人机的空间结构, 提出一种基于密度聚类的算法, 最小化资源和成本, 解决了大型无人机之间的有效任务分配问题。文献[55]为解决传统的植绒运动方法应用时的场景局限性, 提出一种基于数字孪生的深度强化学习训练框架以实现多无人机系统的群集运动。针对无人机群智能协同的复杂性和一致性问题, 文献[56]提出一种新的基于数字孪生的无人机群智能协作框架, 可实现对无人机群全生命周期进行监控, 也可实现快速决策, 探索全局最优解并控制无人机群的行为。

在战场任务执行方面, 文献[57]针对无人机任务规划中的路径择优问题, 提出利用数字孪生技术来实现不同任务不同环境下的最优路径快速选择, 以减少路径选择时任任务站、机器人或无人机位置以及环境拓扑等约束的影响。针对无人机任务的动态特性和完成率较差等问题, 文献[58]提出了一种数字孪生辅助任务分配方法, 以提高多无人机系统中深度强化学习(DRL)的资源密集利用率和效率。针对无人机的高效多目标跟踪问题, 文献[59]提出一个分层的数字孪生辅助跟踪框架, 利用多粒度模拟来实现实时准确高效的多目标跟踪。针对无人机在作战仿真过程中模型精度较低、虚实交互运行较难的情况, 文献[60]基于虚拟孪生技术提出作战仿真系统设计方案, 文献[61]构建了面向无人机侦察打击作战行动的数字孪生平行战场, 用于无人机实际作战仿真及智能化决策辅助。

针对无人机的自主开发和监管问题, 文献[62]提出将数字孪生与其他新兴技术(5G、云平台和VR等)结合起来, 构建起无人机数字孪生体的基本框架。针对无人

机飞行模拟, 文献[63]提出构建无人机的编队模拟和混合飞行平台, 文献[64]提出构建无人机飞行模拟环境和数字孪生支持平台。

针对无人机通信问题, 为探索基于空间数字孪生的无人机系统空域结构和安全性能, 文献[65]提出引入数字孪生技术, 将卷积神经网络算法与无人机自主网络相结合, 并采用无线通信技术构建无人机数字孪生系统。文献[66]构建了一个基于深度学习的无人机数字孪生通信信道模型来探讨无人机在无线通信中的应用效果和局限性。针对无人机采集的照片信息不全、信息遮挡问题, 文献[67]提出利用数字孪生技术来实现增强现实和遮挡处理, 包括对第一人称和鸟瞰视图的遮挡处理。

3.5 当前挑战

3.5.1 模型层面

无论是装备设计、制造、装配还是装备运维, 首要解决的问题就是如何构建可表征空天装备的物理、结构特性和性能参数的装备孪生模型。其次应考虑的是如何对这些模型进行优化升级, 使其可以协助用户完成更多功能的开发。模型作为装备数字孪生体的核心引擎, 如何构建可以自我学习及优化的孪生模型将成为后续研究的重点。现有模型的构造方法通常基于物理学原理、实验数据和计算模拟, 对装备的行为和性能的描述也大多出自理想条件下, 而空天装备受环境、载荷及自身飞行速度、结构和材料等多种因素影响, 其状态仿真和性能预示需要解决力、热、电多物理场强耦合性问题, 如何利用现有技术优化模型构造方法, 让模型学会“自学习”, 提高模型的精度和可信度, 从而准确模拟原系统的真实状态, 实现装备设计与性能预示的革新。同时, 如何协调不同类型模型之间的合作, 包含功能模型、物理模型及控制模型等, 以支持装备设计的跨领域协同, 让不同部门和团队之间共享实时数据和模型, 以进行更好的协同设计和决策。未来的解决方向包括建立完善的建模方法体系、统一的模型管理标准以及更加精细的建模平台, 实现统一平台下的模型统一管理、统一调度, 实现模型之间的数据互通及相互学习协作^[68]。

3.5.2 数据层面

孪生过程中的数据是装备数字孪生体的基础。当前装备生产过程中因为设备类型复杂、通信标准多样、数据来源众多且呈现多源异构的特点, 导致数据采集、管理困难且不易共享的问题, 因此, 如何提升数据采集的准确度与时效性, 以及如何对数据进行高效处理和合理利用就显得尤为重要。如何避免采集的数据存在信息孤岛、异构数据融合难的问题, 如何在利用多传感器进行数据采集时, 合理选择传感器的精度、灵敏度和分布位置, 以及如何建立更高效的数据传输网络以满足数据的低延迟要求, 并解决数据传输的时效性差的问题, 也是亟待研究应用的技术。之后, 如何借助大数据分析技术实现高效率的数据处理及分析, 完成从规模巨大、种类繁多、生成迅速、不断变化的数据集中挖掘价值, 也需要下更多的功夫^[69]。未来的解决方向包含设计更加精细的

传感器，建立更加标准的数据传输协议及通道，应用新型技术实现数据分析挖掘，构建完整的数据流程，保证整个过程的数据完整性。

其次，数字孪生技术的发展推动了空天装备的智能化和数字化发展，而装备的数据隐私和数据安全问题成为制约其应用发展的重要因素。对于空天装备的数字孪生体而言，隐私数据和装备性能参数的保护至关重要。未来需要采取严格的加密技术、权限控制和监控机制来确保数据安全，同时严格遵守相关法规，提高数据隐私和安全保护水平，以推动数字孪生技术的可持续发展^[70]。

3.5.3 过程层面

过程是联系数字孪生系统各组件的纽带，如何利用数字孪生实现过程管理就显得尤为重要。实现装备的过程管理实际上就是解决其设计和制造的过程孪生和解决装配过程的质量监测问题^[71]，针对装备全寿命周期过程管理，就是考虑如何实现全寿命的层次化建模、柔性化管理和自动化映射问题^[72]。以装备装配为例，当前航天装备的研制依然处于“边设计、边生产、边装配”的传统模式，特别在装配过程中，不仅会由于众多不确定因素影响而导致无法准确有效地预测和评估装备的真实进度和装备的实际性能，而且在装配过程中要进行大量且复杂的性能试验，这会极大影响装配效率，同时又因为手工装配的大量存在，导致装备的完成质量难以保证。因此，如何基于数字孪生实现空天装备的装配质量建模和应用，完成对航天装备的装配质量进行在线监测，就显得不可或缺^[73]。未来的解决方向包括利用统一的建模平台和统一的建模语言构建过程模型，将装备的全寿命周期划分为不同的阶段和子系统，建立相应的层次化信息模型，同时设计具有适应性和弹性的装备管理流程，以应对不同装备的需求和变化，并引入信息化技术，实现装备管理的数字化、网络化，提高管理过程的灵活性和实时性，最后还要开发智能化的决策支持系统，实现对装备全寿命周期过程管理的自动化监控、分析和优化。

4 结束语

作为一种能够将实体装备系统与其数字副本结合的技术，数字孪生为现代空天装备的数字化提供了无限的可能。数字孪生视角下的空天装备数字化，一方面体现在其能够通过模拟、监测和优化装备的设计、制造及运维过程，缩短现有装备的研制周期，加快空天装备的创新过程，从而显著提高单个装备乃至整个装备体系的数字化程度；另一方面体现在对于某些特殊空天装备来讲，数字孪生还可以通过实时监测并模拟装备的运行过程，帮助装备进行实时自主决策，使其具有更强的自适应性和自主性，提高任务执行的精准性和安全性，从而促进装备技术的二次革新。但囿于目前孪生技术的不成熟和装备研发技术的限制，尚存在一些值得持续研究和不断深化的地方，如装备的数据采集、孪生模型的构建和全生命周期的过程仿真等。相信随着孪生技术的不断发展，

这些难点、痛点也将得到很好的解决，数字孪生必将会为未来空天装备的智能化创新和信息化发展提供更广阔的空间，从而推动空天装备技术迈向新的高度。

参考文献：

- [1] 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)
- [2] 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)
- [3] 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): 023615.
Meng Songhe, Ye Yumei, Yang Qiang, et al. Digital Twin and Its Aerospace Applications[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(9): 023615. (in Chinese)
- [4] Liu M N, Fang S L, Dong H Y, et al. Review of Digital Twin about Concepts, Technologies, and Industrial Applications[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 346–361.
- [5] Li L N, Aslam S, Wileman A, et al. Digital Twin in Aerospace Industry: A Gentle Introduction[J]. IEEE Access, 2022, 10: 9543–9562.
- [6] Xiong M L, Wang H W. Digital Twin Applications in Aviation Industry: A Review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121(9): 5677–5692.
- [7] 肖飞, 张为华, 王东辉, 等. 数字孪生驱动的固体发动机总体设计体系架构与应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1405–1418.
Xiao Fei, Zhang Weihua, Wang Donghui, et al. System Architecture and Applications for Overall Design of Solid Rocket Motor Based on Digital Twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1405–1418. (in Chinese)
- [8] 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): 1348–1360.
Wang Jianjun, Xiang Yongqing, He Zhengwen. Models and Implementation of Digital Twin Based Spacecraft System Engineering[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1348–1360. (in Chinese)
- [9] 陶飞, 张辰源, 张贺, 等. 未来装备探索: 数字孪生装备[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(1): 1–16.
Tao Fei, Zhang Chenyuan, Zhang He, et al. Future Equipment Exploration: Digital Twin Equipment [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(1): 1–16. (in Chinese)
- [10] Jones D, Snider C, Nassehi A, et al. Characterising the Digital Twin: A Systematic Literature Review[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2020, 29: 36–52.
- [11] 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)
- [12] 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 Wenjie, Wang Guoxin, Yan Yan, et al. Intelligent Test of Spacecraft Based on Digital Twin and Multi-Agent Systems [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(1): 16–33. (in Chinese)
- [13] Yin Z H, Wang L. Application and Development Prospect of Digital Twin Technology in Aerospace[C]// IFAC-Papers on Line, 2020.
- [14] Hänel A, Schnellhardt T, Wenkler E, et al. The Development of a Digital Twin for Machining Processes for the Application in Aerospace Industry [C]// 53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2020.
- [15] Bessa W M, Dutra M, Kreuzer E. Adaptive Fuzzy Control of Electrohydraulic Servosystems[EB/OL]. (2022–05–31) [2024–01–01]. <http://arxiv.org/abs/2205.15639>.
- [16] LaFarge N B, Howell K C, Folta D C. Adaptive Closed-Loop Maneuver Planning for Low-Thrust Spacecraft Using Reinforcement Learning[J]. Acta Astronautica, 2023, 211: 142–154.
- [17] Brusa E, Dagna A, Delprete C, et al. An Orchestration Method for Integrated Multi-Disciplinary Simulation in Digital Twin Applications[J]. Aerospace, 2023, 10(7): 601.
- [18] Zhao H M, Sun Z W, Zhang H Z. Application of Knowledge Engineering in Spacecraft Overall Design[J]. Journal of Physics, 2020, 1510(1): 012015.
- [19] Rathore M M, Shah S A, Shukla D, et al. The Role of AI, Machine Learning, and Big Data in Digital Twinning: A Systematic Literature Review, Challenges, and Opportunities[J]. IEEE Access, 2021, 9: 32030–32052.
- [20] Jamshidi V, Nekoukar V, Refan M H. Analysis of Parallel Genetic Algorithm and Parallel Particle Swarm Optimization Algorithm UAV Path Planning on Controller Area Network[J]. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 2020, 31(1): 129–140.
- [21] Chai R Q, Tsourdos A, Savvaris A, et al. Review of Advanced Guidance and Control Algorithms for Space/Aerospace Vehicles[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2021, 122: 100696.
- [22] Zhuang C B, Liu Z W, Liu J H, et al. Digital Twin-Based Quality Management Method for the Assembly Process of Aerospace Products with the Grey-Markov Model and Apriori Algorithm[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 35(1): 105.
- [23] Mekki B S, Langer J, Lynch S. Genetic Algorithm Based Topology Optimization of Heat Exchanger Fins Used in Aerospace Applications[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 170: 121002.
- [24] Chu X, Ilyas I F, Krishnan S, et al. Data Cleaning: Overview and Emerging Challenges[C]// International Conference on Management of Data, 2016: 2201–2206.
- [25] Zhang Z H. Missing Data Imputation: Focusing on Single Imputation[J]. Annals of Translational Medicine, 2016, 4(1): 9.
- [26] Aneetha A S. The Combined Approach for Anomaly Detection Using Neural Networks and Clustering Techniques[J]. Computer Science & Engineering, 2012, 2(4): 37–46.
- [27] Bleiholder J, Naumann F. Data Fusion[J]. ACM Computing Surveys, 2009, 41(1): 1–41.
- [28] Castanedo F. A Review of Data Fusion Techniques[J]. The Scientific World Journal, 2013, 2013: 704504.
- [29] Meng T, Jing X Y, Yan Z, et al. A Survey on Machine Learning for Data Fusion[J]. Information Fusion, 2020, 57(C): 115–129.
- [30] Liu S M, Bao J S, Zheng P. A Review of Digital Twin-Driven Machining: From Digitization to Intellectualization[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2023, 67: 361–378.
- [31] Li L N, Aslam S, Wileman A, et al. Digital Twin in Aerospace Industry: A Gentle Introduction[J]. IEEE Access, 2022, 10: 9543–9562.
- [32] Tang W B, Xu G S, Zhang S J, et al. Digital Twin-Driven Mating Performance Analysis for Precision Spool Valve[J]. Machines, 2021, 9(8): 157.
- [33] 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 Hao, Yang Fan, Wang Bin, 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. (in Chinese)
- [34] 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 Lu, Shao Yifu, Guo Yuyuan, et al. Intelligent Design System of Satellite Equipment Based on Digital Twin[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(S2): 139–145. (in Chinese)
- [35] Wang Y C, Zhang N, Li H S, et al. Research on Digital Twin Framework of Military Large-Scale UAV Based on Cloud Computing[J]. Journal of Physics, 2021, 1738(1): 012052.
- [36] Wang Z X, Chen P, Qin Y J, et al. Digital Twin System for Propulsion Design of UAVs[C]// 18th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry, 2022: 1–9.
- [37] Jeon H Y, Justin C, Mavris D N. Improving Prediction Capability of Quadcopter through Digital Twin[C]// AIAA Scitech 2019 Forum, 2019.
- [38] Errandonea I, Beltrán S, Arrizabalaga S. Digital Twin for Maintenance: A Literature Review[J]. Computers in Industry, 2020, 123: 103316.
- [39] 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 Jie, Xia Chao, Xiao Shili, et al. Rocket Launch Safety System Design Scheme Based on Digital Twins[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1337–1347. (in Chinese)
- [40] 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.
Zhang Suming, Yue Mengyun. A Rocket Health Management System for Vehicle Testing and Launching Base on Digital Twin[J]. Computer Measurement & Control, 2021, 29(5): 8–14. (in Chinese)
- [41] 韩文婷, 程龙, 韩文婧, 等. 数字孪生驱动的火箭控制系统健康管理框架[J]. 航天控制, 2022, 40(6): 62–73.

- Han Wenting, Cheng Long, Han Wenjing, et al. Research on Prognostics Health Management Framework of Rocket Control System Driven by Digital Twin [J]. Aerospace Control, 2022, 40(6): 62–73. (in Chinese)
- [42] 周潇雅, 肖进, 张茜, 等. 基于数字孪生的导弹结构动力学响应快速预测技术研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2022(5): 110–114.
- Zhou Xiaoya, Xiao Jin, Zhang Qian, et al. Research on Fast Prediction of Missile Dynamic Response Based on Digital Twin [J]. Missiles and Space Vehicles, 2022(5): 110–114. (in Chinese)
- [43] Fu C C, Gao C, Zhang W F. A Digital-Twin Framework for Predicting the Remaining Useful Life of Piezoelectric Vibration Sensors with Sensitivity Degradation Modeling [J]. Sensors, 2023, 23(19): 8173.
- [44] Yang Y L, Meng W, Zhu S Q. A Digital Twin Simulation Platform for Multi-Rotor UAV [C] // 7th International Conference on Information, Cybernetics, and Computational Social Systems (ICCSS), 2020.
- [45] 张生琨, 任素萍, 杨星雨, 等. 基于数字孪生的无人机状态监测方法[J]. 航空计算技术, 2023, 53(2): 75–79.
- Zhang Shengkun, Ren Suping, Yang Xingyu, et al. Unmanned Aerial Vehicle Condition Monitoring Method Based on Digital Twin [J]. Aeronautical Computing Technique, 2023, 53(2): 75–79. (in Chinese)
- [46] 纪广, 郝建国, 张中杰, 等. 四旋翼无人机飞行过程孪生仿真研究[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(12): 66–73.
- Ji Guang, Hao Jianguo, Zhang Zhongjie, et al. Twin Simulation of Flight Process of Quadrotor UAV [J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(12): 66–73. (in Chinese)
- [47] Liu S M, Bao J S, Lu Y Q, et al. Digital Twin Modeling Method Based on Biomimicry for Machining Aerospace Components [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 180–195.
- [48] He B, Bai K J. Digital Twin-Based Sustainable Intelligent Manufacturing: A Review [J]. Advances in Manufacturing, 2021, 9(1): 1–21.
- [49] Li Y F, Li M, Yan Z, et al. Application of Life Cycle of Aero-engine Mainshaft Bearing Based on Digital Twin [J]. Processes, 2023, 11(6): 1768.
- [50] Zhao W K, Li R Y, Liu X L, et al. Construction Method of Digital Twin System for Thin-Walled Workpiece Machining Error Control Based on Analysis of Machine Tool Dynamic Characteristics [J]. Machines, 2023, 11(6): 600.
- [51] Mhenni F, Vitolo F, Rega A, et al. Heterogeneous Models Integration for Safety Critical Mechatronic Systems and Related Digital Twin Definition: Application to a Collaborative Workplace for Aircraft Assembly [J]. Applied Sciences, 2022, 12(6): 2787.
- [52] 方荣辉, 杨淑群, 兰宁. 基于数字孪生的无人机巡航系统[J]. 制造业自动化, 2022, 44(11): 98–101.
- Fang Ronghui, Yang Shuqun, Lan Ning. UAV Cruise System Based on Digital Twin [J]. Manufacturing Automation, 2022, 44(11): 98–101. (in Chinese)
- [53] 朱秋明, 倪浩然, 华博宇, 等. 无人机毫米波信道测量与建模研究综述[J]. 移动通信, 2022, 46(12): 2–11.
- Zhu Qiuming, Ni Haoran, Hua Boyu, et al. A Survey of UAV Millimeter-Wave Channel Measurement and Modeling [J]. Mobile Communications, 2022, 46(12): 2–11. (in Chinese)
- [54] Yi B, Lü J H, Chen J H, et al. Digital Twin Constructed Spatial Structure for Flexible and Efficient Task Allocation of Drones in Mobile Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023, 41(11): 3430–3443.
- [55] Shen G Q, Lei L, Li Z L, et al. Deep Reinforcement Learning for Flocking Motion of Multi-UAV Systems: Learn from a Digital Twin [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(13): 11141–11153.
- [56] Lei L, Shen G Q, Zhang L J, et al. Toward Intelligent Cooperation of UAV Swarms: When Machine Learning Meets Digital Twin [J]. IEEE Network: The Magazine of Global Internetworking, 2021, 35(1): 386–392.
- [57] Denk M, Bickel S, Steck P, et al. Generating Digital Twins for Path-Planning of Autonomous Robots and Drones Using Constrained Homotopic Shrinking for 2D and 3D Environment Modeling [J]. Applied Sciences, 2022, 13(1): 105.
- [58] Tang X, Li X H, Yu R, et al. Digital-Twin-Assisted Task Assignment in Multi-UAV Systems: A Deep Reinforcement Learning Approach [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(17): 15362–15375.
- [59] Zhou L Y, Leng S P, Wang Q, et al. Tiered Digital Twin-Assisted Cooperative Multiple Targets Tracking [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024: 1.
- [60] 纪广, 郝建国, 张振伟. 面向无人机作战的虚拟孪生系统设计方案[J]. 兵工学报, 2022, 43(8): 1902–1912.
- Ji Guang, Hao Jianguo, Zhang Zhenwei. Design Scheme of Virtual Twin System for UAV Combat [J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(8): 1902–1912. (in Chinese)
- [61] 李灿, 侯兴明, 祁启明, 等. 基于数字孪生的无人机平行作战仿真[J]. 火力与指挥控制, 2023, 48(8): 23–31.
- Li Can, Hou Xingming, Qi Qiming, et al. Parallel Battle Simulation of Unmanned Aerial Vehicle Based on Digital Twin [J]. Fire Control & Command Control, 2023, 48(8): 23–31. (in Chinese)
- [62] Meng W, Yang Y L, Zang J Y, et al. DTUAV: A Novel Cloud-Based Digital Twin System for Unmanned Aerial Vehicles [J]. Simulation, 2023, 99(1): 69–87.
- [63] Souanef T, Al-Rubaye S, Tsourdos A, et al. Digital Twin Development for the Airspace of the Future [J]. Drones, 2023, 7(7): 484.
- [64] Grigoropoulos N, Lalidis S. Simulation and Digital Twin Support for Managed Drone Applications [C] // IEEE/ACM 24th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications, 2020.
- [65] Wang W X, Li X M, Xie L F, et al. Unmanned Aircraft System Airspace Structure and Safety Measures Based on Spatial Digital Twins [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(3): 2809–2818.
- [66] Lü Z H, Chen D L, Feng H L, et al. Beyond 5G for Digital Twins of UAVs [J]. Computer Networks, 2021, 197: 108366.
- [67] Kikuchi N, Fukuda T, Yabuki N. Future Landscape Visualization Using a City Digital Twin: Integration of Augmented Reality and Drones with Implementation of 3D Model-Based Occlusion Handling [J]. Journal of Computational Design and Engineering,

- 2022, 9(2): 837–856.
- [68] 陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生模型构建理论及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(1): 1–15.
Tao Fei, Zhang He, Qi Qinglin, et al. Theory of Digital Twin Modeling and Its Application[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(1): 1–15. (in Chinese)
- [69] 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.
Liu Datong, Guo Kai, Wang Benkuan, et al. Summary and Perspective Survey on Digital Twin Technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 1–10. (in Chinese)
- [70] Wang Y T, Su Z, Guo S L, et al. A Survey on Digital Twins: Architecture, Enabling Technologies, Security and Privacy, and Future Prospects[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(17): 14965–14987.
- [71] 杨帆, 马萍, 李伟, 等. 数字孪生体可信度评估过程及指标研究[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(2): 350–358.
- Yang Fan, Ma Ping, Li Wei, et al. Research on Digital Twin Credibility Assessment Process and Index[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(2): 350–358. (in Chinese)
- [72] 苗田, 张旭, 熊辉, 等. 数字孪生技术在产品生命周期中的应用与展望[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1546–1558.
Miao Tian, Zhang Xu, Xiong Hui, et al. Applications and Expectation of Digital Twin in Product Lifecycle[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1546–1558. (in Chinese)
- [73] 张佳朋, 刘检华, 龚康, 等. 基于数字孪生的航天器装配质量监控与预测技术[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 605–616.
Zhang Jiapeng, Liu Jianhua, Gong Kang, et al. Spacecraft Assembly Quality Control and Prediction Technology Based on Digital Twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(2): 605–616. (in Chinese)

Digitization of Space Equipment from the Perspective of Digital Twin

Chu Zhenhang^{1, 2}, Xiao Fei^{1*}, Guo Jianguo¹, Zhou Min¹, Wang Xuze¹

(1. Institute of Precision Guidance and Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710102, China;
2. Ningbo Institute of Northwestern Polytechnical University, Ningbo 315103, China)

Abstract: Using digital twin technology as the medium, this paper understands modern space equipment digitalization driven by the digital twin technology thoroughly from the three perspectives of data, model and process. Based on the above three perspectives, it analyzes the system composition, feature system and key technologies of the entire equipment digital twin. Then, by combining the application of digital twin technology in some space equipment, the paper discusses the role and advantages of digital twin technology in the design and manufacture of space equipment, and analyzes the application prospect of digital twin in the field of space equipment in the future. Finally, from the above three perspectives of data, model and process, this paper summarizes the current difficulties faced by the digital transformation construction of space equipment research and development, as well as the main contradictions faced by the development of digital twin of equipment. It puts forward new ideas to find possible breakthrough points and solutions to explore a new path to promote the digital transformation of space equipment research and development.

Key words: digital twin; space equipment; equipment digitization; feature system; model twin; data twin; process twin