

数字孪生技术在航天制造领域中的应用

袁胜华¹ 张腾² 钮建伟²

(1 中国空间技术研究院, 北京 100094; 2 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

摘要: 数字孪生是连接现实世界与虚拟世界的数字纽带。作为一种前沿技术, 数字孪生技术通过与大数据、物联网、人工智能技术的结合, 能够实时、动态地反映真实物体运动状态。目前传统航天制造中存在着动态响应能力不足、部门间信息整合能力差、地面伴飞系统建造成本高等问题。本文探讨数字孪生技术在航天制造领域下的应用集成方案, 旨在为传统航天制造业改进提供思路。首先介绍数字孪生技术提出的背景及其概念, 其次论述数字孪生相关技术, 随后探讨了数字孪生在航天制造车间管控、控制系统智慧仿真、航天器数字伴飞等场景下的应用模式, 最后总结数字孪生技术在航天应用中的一些挑战。

关键词: 数字孪生; 车间管控; 智慧仿真; 航天器地面伴飞

中图分类号: TP391.9,V46 文献标识码: A 文章编号: 1006-3919(2020)03-0057-08

DOI: 10.19447/j.cnki.11-1773/v.2020.03.009

The Application of Digital Twin Technology in Aerospace Manufacturing

YUAN Sheng-hua¹ ZHANG Teng² NIU Jian-wei²

(1 China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China; 2 School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Digital twin is a digital link connecting the real world and the virtual world. As a cutting-edge technology, digital twin technology can reflect real-time and dynamic motion state of real objects by combining with big data, Internet of things (IoT) and artificial intelligence (AI) technology. At present, there are some problems in traditional aerospace manufacturing, such as insufficient dynamic response ability, poor information integration ability between departments, and high construction cost of ground accompanying flight system. This paper discusses the application integration scheme of digital twin technology in the field of aerospace manufacturing, aiming to provide ideas for the improvement of traditional aerospace manufacturing. This paper first introduces the background and concept of digital twin technology, then discusses the related technology of digital twin, and then discusses the application mode of digital twin in aerospace manufacturing workshop management and control, intelligent simulation of control system, and digital companion flight of spacecraft. Finally, some challenges of digital twin technology in aerospace application are summarized.

Key words: digital twins; workshop control; smart simulation; spacecraft ground companion

0 引言

伴随着信息技术、工程系统的快速发展, 以

航天、工业制造为代表的现代工程日益呈现出高度集成化的趋势。日趋复杂的项目流程、现代化

收稿日期: 2020-03-02; 修回日期: 2020-05-15

基金项目: 装备预研重点实验室基金(6142222190309)

作者简介: 袁胜华(1978—), 男, 高级工程师, 研究方向: 数字化制造; (100094) 北京市海淀区友谊路 104 号。

设施设备使得项目实施的整个生命周期拉长。其次,随着现代工程系统迭代速率加快、系统环境的不确定性因素增加进而导致系统运行中不确定性因素加大。对于复杂系统的周期性维护上,由于缺乏对系统状态进行有效的预估,会导致系统未能及时维修而失效情况,过于频繁的检测又会导致维护成本的增加。不确定、动态的系统环境使得传统的数据监控驱动技术无法对复杂系统进行实时动态的评估。

信息技术的发展,尤其是诸如大数据分析、物联网、云计算、人工智能等新一代信息技术的出现,使得传统制造业的数字化进程大大加速,数字化时代已经成为社会的共识,并成为领域创新的主要动力。由此催生的数字孪生技术正彻底的改变行业发展。数字孪生提供了一种独特的方式来反映数字世界中的物理实体的形状、位置、状态和运动^[1],加上感官数据采集、大数据分析、以及人工智能和机器学习,数字孪生技术可用于系统实施过程中的监视、诊断、预测和优化^[2]。通过物理世界和虚拟世界的融合,数字孪生提供了一种实现网络与物理集成的独特方法,这一概念已为越来越多的企业所采用。实物实体及其数字化表示的有机整体,它们通过双向交互作用进

行交流、促进和共同发展^[3]。通过各种数字化技术,将实体的行为、物理世界的关系从整体数字化创建高保真的虚拟模型^[4]。这样的虚拟模型依赖于从物理世界下的真实世界数据配制他们的实时参数、临界条件,从而导致相应的物理实体状态更新,通过评估进行中的状态、诊断历史问题以及预测未来趋势。

1 数字孪生概念

数字孪生的概念起源于美国阿波罗计划^[5]:为反映飞船在执行任务中的实际状态,进而为飞船的维护提供参考依据,其构想是在地面建造一个与实际物理飞行器等比例的地面飞船,在地面飞行器上反映实际飞行器的运行状态。数字孪生的概念模型(如图1所示)最早出现于2003年,美国密歇根大学Grievies M. W.教授在其产品全生命周期管理(Product Life cycle Management, PLM)课程^[6]上提出“等同于物理产品的虚拟化数字形式”概念,2010年,美国国家航天局(NASA)在“太空技术路线图”中引入数字孪生概念^[7],为了确保航天器在动态复杂的太空环境中安全有效的运行,提出采用数字孪生技术对航天系统的运行状态进行诊断与预测。

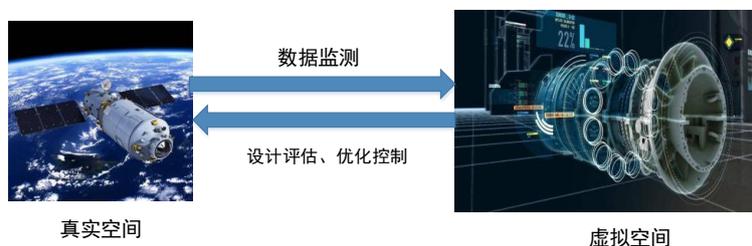


图1 数字孪生体示意图

Fig.1 Figure of digital twin technology

NASA 和美国空军共同提出未来基于数字孪生下的航天器构建模型。基于航天器的历史飞行数据、实时传感器数据在平台上进行概率性、多维度的仿真,以此来构建高保真的虚拟物理模型。通过这样的映射利用虚拟化的数字体来反映飞行器物理系统的全生命周期过程,进而实现飞行器健康状态、剩余使用寿命以及任务可达性的预测。NASA 和空军研究实验室(AFRL)的数字孪生范例的问世^[8],代表了众多限制的突破(数据采集、数字建模以及计算性能优化和算法等)。随着

越来越多的研究人员致力于数字孪生的研究,相关出版物的数量开始呈指数增长^[9]。陶飞等人^[10]在2017年1月提出了孪生车间的概念,并讨论了孪生车间的特性,组成要素,系统运行机制和关键技术,这为数字孪生在制造业中的应用奠定了理论基础。随后,为促进孪生技术在更多领域应用,陶飞^[11]扩展了现有的3维孪生模型,并增加了两个维度(数据和服务)以提出基于5维的数字孪生模型。目前,格里夫斯(Grievies)和美国宇航局(NASA)给出了数字孪生两个最广泛接受定义,NASA将太空飞行器的数字孪生定义为:

基于历史飞行数据、传感器数据对航天器系统进行多物理场、多维度、概率性的仿真,以此来反映航天器的运行状态及其整个生命周期历程^[8]。

2014年,Grievess发布了有关数字孪生白皮书,根据该白皮书,基本的孪生模型包括三个主要部分

- a) 实际空间中的物理产品;
- b) 虚拟空间中的虚拟产品;
- c) 能够将虚拟和实际产品结合在一起的数据和信息的连接^[7]。

2 数字孪生辅助技术

数字孪生下的物理实体、虚拟模型、孪生数据、智能服务与连接等子模块需要多种技术支持。对于物理实体,对物理世界的充分理解是数字孪生的前提。在此基础上将物理实体和过程映射到虚拟空间,以使模型更准确,更接近实际。对于虚拟模型,各种建模技术至关重要。虚拟模型的准确性直接影响孪生的有效性。因此,必须通过验证、和认证技术对模型进行验证,并通过优化算法对其进行优化。此外,仿真和追溯技术可以实现质量缺陷的快速判断和可行性验证。由于虚拟模型必须随着物理世界中的不断变化而进行动态的更新,因此需要模型演化技术来驱动模型的更新。在孪生的实际进行阶段,传感器会生成大量数据。为了从原始数据中提取有用的信息,高级数据分析和融合技术是必要的,该过程涉及数据收集、传输、存储、处理、融合和可视化。

2.1 认知和控制辅助技术

物理世界中各个实体之间存在复杂的属性连接(包括显式的和隐式的)。虚拟模型的创建基于物理世界中的实体的关键内部交互联系逻辑和其与外部关系。这样一个反映真实物理世界的虚拟模型构建较为复杂。首先需要对物理世界内部、外部联系有充分的理解和认知。要创建高保真模型,必须物理世界有一个充分的认知并能充分的对数据进行解读,为此要求使用新技术来更好地感知物理世界。

复杂的数字孪生系统通过不断提取实时传感器和大量的多源、异构数据系统数据。针对提取的数据大数据分析提供了一种了解物理世界的新方法,通过大数据分析可以从复杂数据现象中找到有价值的信息。在对数据进行充分的分析后对

物理实体有了充分理解基础上,当实体世界中的实体执行预期的行为时,通过控制系统控制,来驱动其执行器以准确完成指定的动作,而这样的驱动实体过程涉及动力技术、驱动技术和控制技术。

2.2 数字孪生建模支持技术

建模可以说是数字孪生的基石,它为系统的前期设计、分析、装配加工、质量检查、生产管理等提供了有效的信息联系表征方法。与孪生相关的建模涉及几何建模、物理建模、行为建模和规则建模。建模针对多目标和完整性能进行优化,以达到高精度、可靠性并重现动态和静态特性。此外,结合历史数据的使用,各种模型(例如结构分析模型、热力学模型、产品故障以及寿命预测和分析模型等)可以通过贝叶斯、机器学习算法等逐步优化。当前的建模技术着重于几何和物理模型的构建,缺少可以从不同空间比例的不同粒度表示行为、特征和规则的“多空间比例模型”,缺少可以表征不同时间尺度的物理实体的动态过程“多时间尺度模型”。从系统角度来看,集成具有不同维度、不同空间比例和不同时间比例的各种模型仍然是一个挑战。

2.3 数字孪生数据管理技术

数据驱动的数字孪生可以感知,响应并适应不断变化的外部环境。整个数据生命周期包括数据收集、传输、存储、处理、融合和可视化,数据存储用于存储传感器收集的数据,以进行进一步的处理、分析。数据存储与数据库技术密不可分。但是,由于多源数据的数量和异构性不断增加,传统的数据库技术已不再可行,大数据存储技术,例如分布式文件存储(DFS)、NoSQL数据库、云存储等越来越受到关注。

在数据处理阶段,需要从大量不完整、异构、嘈杂、模糊和随机的原始数据中提取有用的信息。首先,对数据进行预处理,以删除冗余、无关、干扰、重复和不一致的数据。相关技术包括数据清洗、数据压缩、数据平滑、数据约简、数据转换等。此外,深度学习为处理和分析海量数据提供了先进的分析技术^[12]。数据融合通过合成、过滤、关联和集成来应对多源数据。数据融合包括原始数据级融合、特征级融合和决策级融合。数据融合方法包括随机方法和人工智能。随着数据量的不断增加,现有数据技术必将发展。对于数

据收集,未来的数据采集技术应专注于实时状态数据收集。因此,有必要探索智能识别技术、先进的传感器技术、机器视觉技术、自适应访问技术等。

2.4 数字孪生连接技术

在物理实体与模型数据和服务的连接中,对物理实体的识别、感知和跟踪是至关重要。因此,就需要运用 RFID、传感器、无线传感器网络和其他物联网技术。数据交换需要运用通信技术^[13]、统一通信接口和协议技术等。由于人类在物理和虚拟世界中进行交互,因此需要人机交互技术(例如 VR、AR、MR)以及人机交互和协作^[14]技术支持。给定许多不同的模型,需要通信、接口、协议和标准技术,以确保虚拟模型和数据之间的平滑数据交互。同样,服务与虚拟模型以及数据之间的连接也需要通信接口、协议、标准技术和协作技术。最后,必须采用安全技术(例如,设备安全、网络安全、信息安全)来保护孪生的安全。在数字孪生的连接中,应更加注意通信接口和协议技术、人机交互技术以及安全技术。

3 传统航天制造下的应用

数字孪生在航天中的应用一直受到国内外广泛关注,主要包括基于数字虚拟体的航天器设计、在轨运行损耗预测、全生命周期下的故障检测等场景。在2010年发布的航天发展路线中,NASA提出要在2027年前后实现数字孪生体在航天中全面应用的目标^[7],在该路线图中,NASA提出了数字孪生技术下的以下应用场景

1)在航天飞行器的设计阶段,利用虚拟仿真技术来分析不同参数指标下的运行状态对任务的影响,通过改变不同参数组合,发现设计中潜在问题并制定相应的处理措施来极大程度上应对实际飞行中出现的突发状况。

2)在航天器实际执行飞行任务的过程中,对航天器的物理信息进行实时的检测(材料损伤状态、温度、载荷等),以此来反映航天器的真实飞行状况,通过这样动态同步的检测,地面指挥人员能给对航天器状况进行更为全面的评估。

3)当传感器数据显示航天器的物理性能出现退化时,通过孪生虚拟体对故障和损伤进行评估来诊断航天器出现异常状况的原因,进而给出较为合理的应对措施。

4)通过虚拟体平台上控制组件的物理性能来分析组件性能变化时对运行任务的影响,可以做为设计评估的有效手段,避免因设计的不合理性带来后期不必要的修正成本。NASA预计到2035年,数字孪生技术的应用能够大大的降低因前期设计的不合理性带来的修正成本,并有效的延长航天器服役的期限^[15]。目前国内外数字孪生在航天领域的主流应用场景有以下几个方面。

3.1 航天制造车间生产管控集成

针对航天器加工车间在加工制造中普遍存在的应变能力不足、生产周期较长、精细度差等问题,将数字孪生技术应用在航天器生产车间并结合异步化的信息交互架构做为生产管控有效的手段来有效的解决这类问题。

基于数字孪生车间架构(Digital Twin Shop-floor, DTS)理论^[16],航天制造车间的数字孪生网络架构由以下几方面组成:物理层、模型层、数据层、服务层、应用层。物理层反映着真实车间的设施、设备等实体信息。模型层表征着物理实体到虚拟体的映射关系、规则。数据层反映着车间设备的运行状态、环境状况、能耗信息等,通过建立数据库,对设备和环境的状态数据进行实时的收集为系统的分析、决策提供依据。服务层主要提供与车间底层相关的设施、设备的能耗、故障管理服务。提供与生产作业相关的计划排产、质量控制、能效评估等管控服务。应用层主要满足硬件资源方面的应用需求(设备监控、预防维护、故障诊断)。在此基础上,相关的车间管理、生产人员将生产调度信息进行集中的展示来提高决策水平。

在航天制造数字孪生车间架构下,如图2所示,数字孪生车间由实体车间(反映真实物理状态)、虚拟车间(基于模型物理空间映射)、孪生数据(物理车间的动态实时数据)、车间管控系统(计划排产、质量控制、效能评估管控)等四部分组成。物理车间和虚拟车间通过孪生数据进行互联,进而能够使得车间整个生产流程与要素进行实时的信息交互和融合,如此一来能够有效的对车间制造资源、生产过程和产品质量的管控提供支撑。

基于数字孪生的航天制造车间在制造过程和车间运行下采用由设备到车间的过程管控模式。与一般的车间管控模式不同,基于数字孪生的航

天制造车间管控是将设备层、制造过程、车间运行层面下的物理车间实体映射到虚拟数字车间上,在此基础上结合孪生数据实时分析、历史模型库感知等手段,实现全过程生产数据流通的闭环,使得车间生产管控更加的智能、透明化,进而解决航天生产过程中资源配置不合理、协同性差等问题^[17],实现车间制造资源的优化配置。

车间数字孪生实时分析车间的生产作业计划率、物流效率,同时根据物联网系统采集的设备状态、能耗、工艺数据,实时分析设备利用率、故障率、车间能耗进而对生产线效能、产品质量、生产效益等进行多维分析、评估和动态展示。通过构建典型产品关键构件信息库,为后续产品质量追溯与工艺优化提供依据。

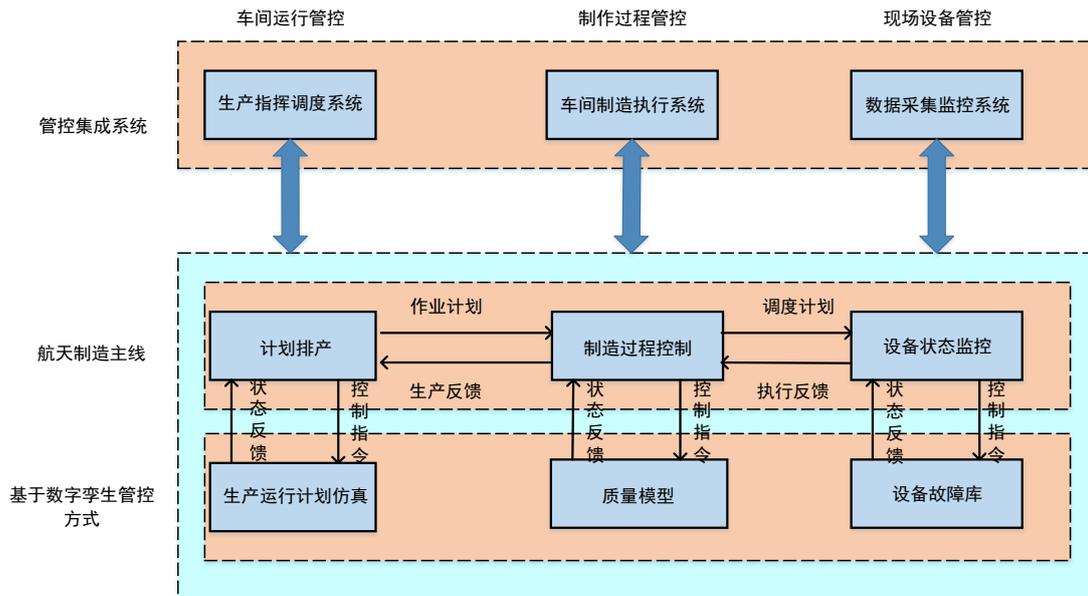


图 2 基于数字孪生航天器车间架构系统

Fig.2 Spacecraft workshop frame of digital twin technology

3.2 航天控制系统智慧设计仿真

随着国防工业和航天产业的快速持续发展,航天器构件日益呈现出多样化、复杂化趋势,与此同时,随着在轨航天器材构件型号的不断增多、航天器材的服役预定期限也在不断的变长,这样就会导致对航天器材维护的难度也会增加,同时对器材研制周期、质量提出了更高的要求。基于模型的系统工程 (Model-Based Systems Engineering, MBSE)在航天器设计制造领域发挥着越来越重要的作用^[18]。虽然现在已经初步形成针对方案设计、需求生成、仿真验证的航天控制设计仿真系统,而面向复杂任务要求和敏捷开发设计需要,仍存在如下问题:(1)传统开发模式下,都是以单一项目为中心进行方案设计与仿真验证集成,大多都采用串行的研制流程来实现从航天器的设计到服役的整个周期。这样一来,由于缺乏有效的部门间沟通了解,不同部门之间就

各部门对其他部门的需求和能力水平缺乏理解,下游开发部门所具有的知识难以融入到早期方案设计与验证,产品反复迭代使得开发进程较慢导致产品的延期完成(2)串行研发模式使得不同部门的知识不能进行很好的整合,知识经验呈现碎片化存在“信息孤岛”现象,研制过程中缺乏对数据的收集、整合、挖掘能力。这样一来,一方面降低了对动态数据的利用效率,另一方面由于不能充分的对原始数据信息进行有效的提取,无法及时发现故障的根源。

航天控制系统智慧设计仿真(如图 3 所示)旨在利用数字孪生技术构建信息物理融合的设计仿真系统^[19],以数字纽带作为接口,以仿真模式应对未来型号的需求。未来基于大数据和历史知识库建模技术,根据物理实体的材料特征、空间结构、连接方式等参数,自动生成质量特性、边界条件等孪生模型要素。通过大数据和高性能集

群式计算方式可基于地面试验、测试以及遥感数据库,利用深度学习的方式进行自动化建模。为构件提供更加高精度、高细度的智能模型,以此来验证构件集成的可行性。进而实现基于模型驱动下研制全过程的闭环数字化集成。

航天器在轨运行状态通过实体与虚体进行数据交换以实现实时更新,通过仿真大数据智能比对来监测识别航天器在轨异常状态。建立终端进

行数据共享使得设计师可随时访问,极大地丰富了研制工程中交互性同时也提高问题处理效率。应对在轨未知状况,运用在轨处理算法在航天器的虚拟数字孪生体上进行仿真验证,以此来确保方案的可行性。通过在轨数据实时分析为系统方案和部件评估提供技术保障并指导方案改进、部件升级。

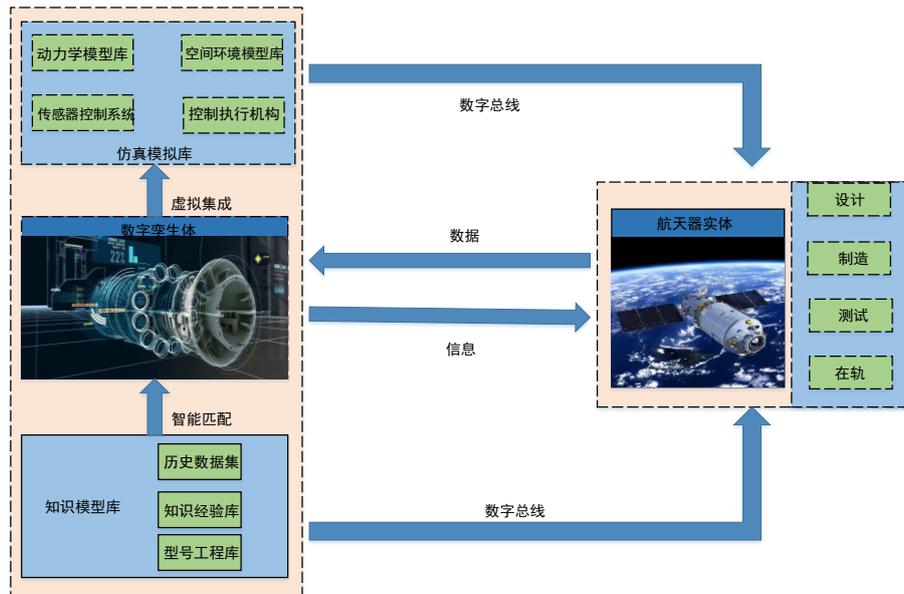


图3 基于数字孪生航天控制系统系统架构

Fig.3 Aerospace control system frame of digital twin technology

3.3 数字孪生伴飞

对于长期在轨运转的飞行器,为了对其状态进行监测,一般的做法是在通过建立地面伴飞系统使其实际经历航天器的环境、操作情况,监测地面飞行器的结构状态决定是否需要维护更换。传统伴飞系统方式存在以下不足之处

1)由于需要在地面上建立与真实航天器结构完全相同的系统,导致建造的成本较高且周期较长;

2)由于地面系统只是真实空间站的局部反映,其对空间环境的模拟能力较为有限。

针对上述地面伴飞系统和可重复使用飞船中存在的种种局限性,数字孪生伴飞系统框架的提出,可以用于空间站全生命跟踪并预示其行为状态,以实现更好地管理与决策。通过飞行器的各类物理传感器实时的收集航天器自身状态数据,将状态数据传回地面伴飞系统,在地面伴飞系统

中集成虚拟数字孪生模型,并将数据传入到虚拟模型中。这样就实现了系统动态更新。结合应用端的系列平台,对航天器结构状态进行动态分析进而对部件的损伤状态进行跟踪,进一步优化航天器的设计、制造、维护等操作。

基于航天器伴飞的数字孪生应用框架(如图4所示)是建立在数字孪生建模与分析模块基础上的,该架构分为线上和线下两部分。其中,线下部分的核心是构建先验知识模型库。在构建的模型库基础上,借助复杂系统建模技术,建立飞行器系统的行为、演变模型^[20]。同时基于大数据分析技术提取数据特征,将特征数据用于在线分析,线上部分包括对部件结构进行动态化的状态监测、故障分析。结合数字主线中存储的历史数据通过先验知识确定可能故障,将可能故障在仿真模型上进行预演。基于行为数据来构建故障模式库,该模式库可作为诊断模块的故障识别基础。

运用传感与监测技术实时获取反映飞行器动态结构数据,对异常数据进行检测,采用模式识别方法对故障模式进行分析,根据模式库鉴别系统的潜在故障,将故障模式进行分类并以量化的形式显示结构的损伤程度。而后,将故障模式与损伤状态传递给动态演化分析模块,对系统结构状态进行动态更新。在虚拟仿真平台,模型结合大数据分析技术可以开展系统性能评价、剩余寿命及其飞行可靠性预测,进而为后续任务调度提供参考依据。在线传感器端产生的实时数据、状

态参数结合离线端的历史数据、模型数据都可由数字主线统一的管理。各个模块之间可以通过数据纽带进行随时的访问、补充、共享。

未来孪生伴飞可以有很多的应用场景:在航天器的设计验证阶段,通过虚拟实验可以对可能出现的问题进行预分析进而减少设计的重组;在制造装配阶段,通过对生产过程的监控可以加速生产减少缺陷;在测试运行阶段,可以对系统的状态进行实时的诊断;通过人机交互和可视化技术可以帮助航天员进行任务预演,在轨维护。

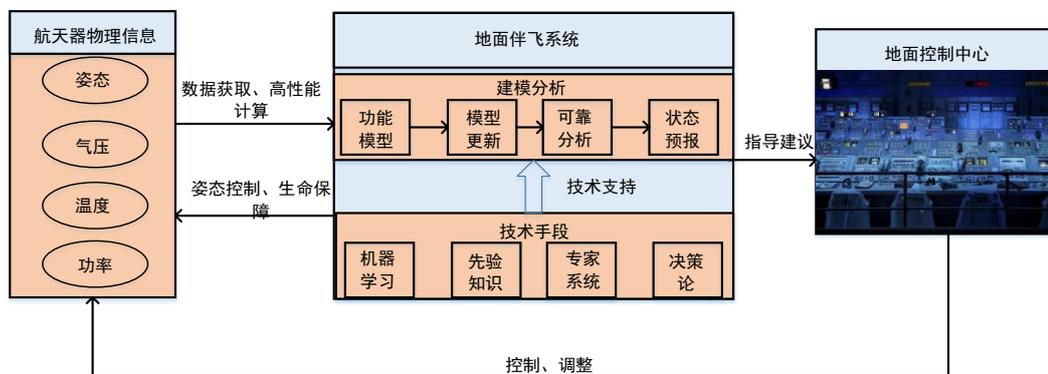


图4 基于数字孪生的航天器伴飞系统

Fig.4 Spacecraft accompany fly system of digital twin technology

4 结论

不断发展的信息化、数字化技术催生了数字孪生。数字孪生是一个集成了跨学科复杂系统,数字孪生是能够反映物理实体的虚拟数字实体映射,利用动态实时数据基于历史经验模型进行信息整合,使得人们对于不确定环境下的复杂系统有着更为全面的认知,进而实现对系统的动态演化行为有着更为精确的描述,指导人们对系统进行更好的决策、控制、优化。数字孪生已应用于智能制造、智慧城市、医疗保健等越来越多的领域。

作为物理世界与数字世界连接纽带,在未来数字孪生技术使得航天器朝着智能化方向发展。通过传感器收集到反映航天器自身运行状态及其所处环境数据,利用虚拟孪生数字平台可以实现航天器自身状态感知、环境感知与态势感知。在此基础上进行任务的自我规划,通过开展自我维护实现成功率更高、服役寿命更长、成本更低的目标。

目前,数字孪生在航天中的应用仍面临一些挑战

1) 数字孪生是一个涉及多领域、跨学科的综合技术体系,其在航天的全面的应用还需要突破动态数据监测分析、复杂系统建模、大数据等关键技术,目前还缺少模型参考,但仍需要不断地探索。

2) 航天基础设计能力不高,缺乏支撑数字孪生体系所需的关键核心部件工艺数字化仿真能力,这是孪生技术在航天领域应用的一大瓶颈。

3) 数字孪生作为新型的系统构造工具,其具体实现手段还不是特别成熟。我国仍需要自主开发数字孪生运行集成平台。

参 考 文 献

- [1] Darya Botkina, Mikael Hedlind, Bengt Olsson, Jannik Henser, Thomas Lundholm. Digital Twin of a Cutting Tool[J]. Elsevier B V, 2018, 72.
- [2] Päävi Parviainen, Maarit Tihinen, Jukka Kääläinen, Susanna Teppola. Tackling the digitalization challenge: how to benefit

- from digitalization in practice [J]. International Journal of Information Systems and Project Management, 2017, 5(1).
- [3] Christine Legner, Torsten Eymann, Thomas Hess, et al. Digitalization: Opportunity and Challenge for the business and information systems engineering community [J]. Business & Information Systems Engineering, 2017, 59(4).
- [4] Ying Cheng, Yongping Zhang, Ping Ji, et al. Cyber-physical integration for moving digital factories forward towards smart manufacturing: a survey [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1-4).
- [5] Anthony Nicoli. Employing the Electrical Digital Twin to Mitigate Compliance Risk in Aerospace [J]. NASA Tech Briefs, 2019, 43(12).
- [6] M Grieves. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication[R]. White paper Florida Institute of Technology, Melbourne, FL(2014).
- [7] Glaessgen E, Stargel D. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles[C]. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA, 2012.
- [8] M Shafto, M Conroy, R Doyle, et al. Modeling simulation, information technology & processing roadmap[R]. National Aeronautics and Space Administration (2012).
- [9] Roland Rosen, Georg von Wichert, George Lo, et al. About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing [J]. IFAC Papers On Line, 2015, 48(3).
- [10] 陶飞, 张萌, 程江峰, 等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1): 1-9.[TAO Fei, ZHANG Meng, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, , 2017, 23(1): 1-9.]
- [11] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18. [TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, , 2019, 25(1): 1-18.]
- [12] Li C, Mahadevan S, Ling Y, et al. Dynamic Bayesian Network for Aircraft Wing Health Monitoring Digital Twin[J]. Aiaa Journal, 2017, 55(3): 930-941.
- [13] Greyce N Schroeder, Charles Steinmetz, Carlos E Pereira, et al. Digital Twin Data Modeling with Automation ML and a Communication Methodology for Data Exchange [J]. IFAC Papers On Line, 2016, 49(30).
- [14] Yao B, Zhou Z, Wang L, et al. A function block based cyber-physical production system for physical human-robot interaction[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2018: S0278612518300517.
- [15] Harry Millwater, Juan Ocampo, Nathan Crosby. Probabilistic methods for risk assessment of airframe digital twin structures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 221.
- [16] 陶飞, 程颖, 程江峰, 等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(8): 1603-1611.[TAO Fei, CHENG Ying, CHENG Jiangfeng, et al. Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(8): 1603-1611.]
- [17] 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 Jutao, HONG Haibo, ZHONG Keke, et al. Production Management and Control Method of Aerospace Manufacturing Workshops Based on Digital Twin[J]. China Mechanical Engineering]
- [18] G P Krupa. Application of Agile Model-Based Systems Engineering in aircraft conceptual design [J]. The Aeronautical Journal, 2019, 123(1268).
- [19] 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.
- [20] 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/OL]. 航空学报: 1-13. [2020-05-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20200316.0946.006.html>.