

DOI:10.13196/j.cims.2022.01.001

## 未来装备探索:数字孪生装备

陶 飞<sup>1</sup>,张辰源<sup>1</sup>,张 贺<sup>1</sup>,程江峰<sup>1</sup>,邹孝付<sup>2</sup>,徐 慧<sup>3</sup>,王 勇<sup>3</sup>,谢兵兵<sup>4</sup>

(1. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院 数字孪生研究组,北京 100191;

2. 北京航空航天大学 人工智能研究院,北京 100191;

3. 北自所(北京)科技发展有限公司,北京 100120;

4. 北京机械工业自动化研究所有限公司,北京 100120)

**摘 要:**工程装备、制造装备、医疗装备等各类装备是加快国家基础建设,提升国家经济实力和保障医疗健康的重要基础。在新环境、新趋势、新背景下,如何充分融合新一代信息技术,助力装备数智化升级,实现装备软硬系统的自主可控,是实现装备高质量发展,推动数字经济与实体经济融合发展的关键。基于作者团队前期提出的数字孪生五维模型理论基础,探讨了数字孪生装备的概念和组成,分析了数字孪生装备理想特征能力和关键技术,提出了数字孪生装备三阶段发展路径,并在纺织车间物流装备和复材加工车间热压罐装备上对相关理论开展了实践。

**关键词:**装备;数字孪生;数字孪生装备;数字化装备;智能装备

**中图分类号:**TP301.6 **文献标识码:**A

### Future equipment exploration: digital twin equipment

TAO Fei<sup>1</sup>, ZHANG Chenyuan<sup>1</sup>, ZHANG He<sup>1</sup>, CHENG Jiangfeng<sup>1</sup>, ZOU Xiaofu<sup>2</sup>,

XU Hui<sup>3</sup>, WANG Yong<sup>3</sup>, XIE Bingbing<sup>4</sup>

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Institute of Artificial Intelligence, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. RIAMB(Beijing)Technology Development Co., Ltd., Beijing 100120, China;

4. Beijing Research Institute of Automation for Machinery Industry Co., Ltd., Beijing 100120, China)

**Abstract:** Intelligent equipment plays an important role in promoting industrial upgrading and economic development. Many countries have been competing for developing intelligent equipment. However, further enhancing the intelligence of equipment hits a bottleneck caused by the limitation of time, space, technology and cost. Inspired by the digital twin, it could be feasible to give equipment new capabilities and improve its performance by data, model, and service in the information world. Thus, the concept of digital twin equipment was first proposed from four aspects, including definition, composition, ideal capabilities and key technologies. Then, development stages of digital twin equipment were further discussed. Finally, the application of the proposed digital twin equipment was verified by logistics equipment in textile shop-floor and autoclave in composite processing shop-floor.

**Keywords:** equipment; digital twin; digital twin equipment; digital equipment; intelligent equipment

### 1 未来装备发展新趋势与新需求

纵观数千年的人类文明发展历程,各式各样的

工具、设备、装备帮助人类大幅提高创新和生产效率,与此同时,人类的创新活动和新的应用需求又不断反作用于工具、设备、装备的创新与改良,推动其

收稿日期:2021-09-01;修订日期:2022-01-02。Received 01 Sep. 2021; accepted 02 Jan. 2022.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52120105008,52005026)。**Foundation items:** Project supported by the National Natural Science Foundation, China(No. 52120105008,52005026).

功能不断升级更新。随着工具、设备、装备和相关技术的迭代升级,人类文明已先后跨越了石器时代、青铜时代、铁器时代、蒸汽时代和电气时代,进入了当下的信息时代。在信息时代中,由具有机械结构和电气特性的复杂设备和工具以及相应软件系统组成的现代装备,深度参与制造业、土木工程、医疗卫生、国防军工、农业生产、资源勘探、仓储物流、信息通信、交通运输、科学研究、空间探索、生活娱乐等各个领域的相关活动,对人类的生产和生活产生重要积极影响。然而,不断变化的国际竞争环境和国内经济发展趋势,以及不断涌现并逐渐成熟的新一代信息技术,对装备的未来发展提出了新的挑战和新需求。

### 1.1 新环境、新趋势、新挑战

经济全球化迫使装备进一步高质量发展。当前,经济全球化引导着各种生产要素和资源在全球范围内优化组合和配置,在促进多方合作和全球经济迅速发展的同时,加速了各行业从增量发展转变为存量竞争与多方博弈。为提高行业竞争力以面对新的挑战,要求未来装备进一步提高质量、增加效率、丰富功能<sup>[1]</sup>。

疫情/后疫情时代凸显装备远程/自治运行重要性。2020 年新冠疫情全面爆发,导致大量劳动力被迫在家隔离防护,各类装备/设备因缺少操控人员而无法正常运行,大批工厂和设施也因此被迫关闭,对全球实体经济造成了重大不利影响。为提高经济发展对于不确定性事件的韧性,要求未来装备具备远程运维管控、自治和自适应运行的能力。

碳达峰/碳中和要求装备绿色低碳环境友好。自 20 世纪 90 年代以来,快速的工业化和城市化造成自然资源的严重透支和污染物的超标排放,引发温室效应、酸雨、雾霾等一系列环境问题,严重威胁人类的生存。为贯彻可持续发展理念,并如期实现碳达峰、碳中和目标,要求未来装备在制造加工、运维管控、报废回收等环节降低能耗,减少污染物排放。

突破装备自主研制技术瓶颈是实现装备强国的必由之路。近年来,中外贸易摩擦不断,对我国依赖高端装备和核心软硬件引进的产业产生不利影响,不仅如此,国家重要产业相关装备的研制技术受制于人,核心软件依赖于人,还会产生巨大的安全隐患。为突破“被卡脖子”的困境,要求未来装备关键零部件、核心软件以及研发、制造、组装、测试等相关

技术全面自主化,并增强知识产权保护意识,以及提高装备产业链和供应链的自主可控能力。

数字经济亟需数字化装备大力支持,新一代信息技术赋能装备全面升级。自“十二五”国家战略性新兴产业发展规划将信息技术确立为七大战略性新兴产业之一被重点推进以来,互联网、大数据、5G、人工智能、区块链等新一代信息技术发展迅速,与传统产业融合日益深化,催生了一批有活力有韧性的新产业、新业态、新模式<sup>[2]</sup>。国家“十四五规划”再次强调加快数字化发展,大力推进数字产业化和产业数字化,推动数字经济和实体经济深度融合,打造具有国际竞争力的数字产业集群<sup>[3]</sup>。2021 年 10 月,中央政治局第三十四次集体学习中又一次强调,发展数字经济是把握新一轮科技革命和产业变革新机遇的战略选择<sup>[4]</sup>。为进一步激发数字经济潜能,并促进实体经济健康可持续发展,要求各行业现有装备应充分融合新一代信息技术,开创装备实体、数据和新一代信息技术的闭环迭代与互补优化的良性循环模式<sup>[5]</sup>。

综上所述,我国亟需实现现有各类装备的数字化赋能、网络化互联、智能化升级,以及装备软硬件系统的自主可控,并贯彻绿色低碳可持续发展理念,创新装备全生命周期各阶段运作模式,铸造大国重器,建设装备强国。

### 1.2 未来装备全生命周期新需求

装备全生命周期可划分为设计与验证、制造与测试、交付与培训、运维与管控、报废与回收五大阶段。为应对新环境、新趋势和新挑战,未来装备在全生命周期各阶段存在以下具体新需求。

#### 1.2.1 装备设计与验证阶段新需求

##### (1) 设计经验可传承,模型/数据可复用

装备在设计及验证过程中会产生数据和模型,相关人员则不断获得经验和知识,这些数据、模型、经验和知识对于下一代装备,甚至是其他装备的设计或改良具有重要参考价值。为缩短装备设计与验证周期,改善设计人员工作体验,减少装备设计基础共性问题,满足动态市场环境对装备的快速升级迭代和低成本设计研发需求,要求未来装备能够实现:

- ① 设计人员的经验和知识可表示、可存储、可传承;
- ② 设计模型和数据可复用。

##### (2) 一体化设计

装备设计通常包括硬件、软件两部分,以及需求和市场分析、方案设计与论证、技术设计与论证、试

验研究、详细设计、试制、验证改良等环节。为提高装备设计效率,减少设计隐性缺陷,并充分发挥装备软硬件效能,要求未来装备能够实现:①软硬一体化设计,助力装备实现集成化、小型化和轻量化,增强软硬兼容能力,并弱化短板效应;②设计验证一体化,缩短装备设计验证周期,满足装备多样性和快速响应研发需求。

### (3)多学科协同优化设计

装备设计不仅涉及机电液热力磁等多学科专业知识,还需要考虑其在时间域和空间域中的多场耦合复杂特性,以及如何制定合理的加工制造和装配工艺路线。为缩短装备设计周期,探索装备设计全局优解,避免由于沟通不畅导致的错误、缺漏、冲突、冗余和歧义,以及因串行重复设计导致的人力、物力、财力浪费,并改善设计人员工作体验,要求未来装备能够有效支持多学科、多场可行性分析和综合优化设计。

## 1.2.2 装备制造与测试阶段新需求

### (1)数字化制造加工

制造加工过程所涉及的排产与调度、监视与测量、管理与控制等多方面,与装备质量、效率、成本、能耗等密切相关。为进一步优化装备制造过程,提高装备加工质量和效率,降低成本和能耗,要求未来装备在制造阶段能够实现:①数字化规划,通过决策预执行实现排产和调度方案动态寻优;②数字化监测,提高制造过程监测全面性、准确性、时效性、直观性,支持制造过程异常与潜在问题的及时发现与解决;③数字化管控,全面增强装备制造过程动态响应和精准执行能力。

### (2)虚拟增强的质量检测与出厂测试

装备质量监测和出厂测试是在装备制造完成后为装备制造工艺质量监督、装备产品质量等级确定、装备质量改进提供数据依据的重要环节。然而,基于客观物理过程的装备质量检测与出厂测试可能存在以下不足:①检测周期长,变相增加库存压力和成本;②检测不全面,易导致漏检的残次品流入市场,造成安全隐患;③检测过程可能对装备造成损害,缩短装备的使用寿命。因此,要求未来装备的质量检测与出厂测试采用物理与虚拟相结合的方式,提高检测效率,降低漏检风险,减少对受测装备产品的损害。

### (3)过程可复现,质量可溯源

装备质量分析、管控与溯源,对于装备迭代设计

和制造工艺优化具有重要意义。而基于成品抽检方式的装备质量分析可能存在以下不足:①仅能从统计学角度宏观掌握装备质量分布情况,无法掌握未抽检装备的质量水平;②难以准确溯源装备质量问题,从而无法有效支持装备迭代设计和制造工艺优化;③难以区分装备性能和质量的个体差异,无法准确指导装备运维和报废回收阶段的具体决策。因此,要求未来装备的制造过程可准确复现,装备质量可精准溯源。

## 1.2.3 装备交付与培训阶段新需求

### (1)物理与数字双交付

现有装备交付以物理装备交付为主,在产业数字化转型和装备智能化升级的大趋势下,装备使用者、合作开发商、运营商和售后服务提供商等各方对于装备的模型、数据、文档 and 知识等数据资产的需求在快速上升。然而,由上述需求方自行获取装备的数据资产可能存在以下不足:①时间及人力成本高;②数据资产获取难度大,精度和全面性难保证;③数据资产所有权和使用权不明确。因此,建议未来装备在交付过程中,除提供完好的物理装备外,还应提供精准的装备数字化模型和数据,实现物理与数字双交付,助力装备的智能化运维和数字经济的深入发展。

### (2)虚拟仿真实训

现有装备售后操作培训和员工技能培训通常需要依赖物理装备进行,受到场地、时间、装备数量等多方面因素的限制,易造成培训不全面、周期长、成本高等问题。为突破技能培训资源的客观条件限制,实现受训人员技能水平的实时评估与反馈,以及为受训人员提供更全的培训项目、更好的培训体验、更多的试错机会,要求未来装备能够提供基于物理装备的数字化模型和数据实现虚拟仿真实训。

## 1.2.4 装备运维与管控阶段新需求

### (1)运行状态及趋势可感知、可认知、可预知

运维与管控是装备在全生命周期中实现自身价值的重要阶段。为使装备运维管控过程更安全、更高效、更灵活,需要全面掌握装备的任务需求、自身能力、当前行为和所处环境,并超前预测和评估决策方案执行结果,从而更早地发现、解决和预防未来可能发生的异常和问题。为实现上述理想功能,未来装备需首先实现:①运行状态数据精准感知;②多维状态特征精准认知;③运行状态及趋势动态预知。

### (2) 运行过程可控制、可优化、可自治

装备运行过程充满不确定性,装备性能改变、装备运行环境变化、人力资源调度异常、任务变更等客观原因都会直接影响装备的正常运行,而且即便装备能够在上述事件发生时继续正常运行,也难以根据当前实际情况动态改变运行策略,实现高效高品质运行。为使装备面对不确定性事件时能够保持韧性,提高装备运行的效率和质量,未来装备在运行过程中除现场人工控制外,还应具备以下三种能力:①装备运行过程可远程控制,弱化现场环境对装备运行的约束限制;②运行决策可动态优化,弱化不确定性事件对装备运行的负面影响;③装备可自治运行,弱化装备运行对人力资源的依赖程度。

### (3) 软件化、集成化、平台化

装备在完成大型复杂任务时,不仅需要提供多种功能服务,还要与其他装备和人进行功能互补和交互协作。为实现装备功能的灵活调度和动态重构,以及人机物的高效协作,未来装备需实现:①装备软件化,基于软件定义装备的标准硬件面向个性需求提供专用功能,以低成本、低风险和高度灵活的方式实现装备功能的拓展与装备价值的提升;②功能集成化,通过对装备功能进行模块化封装和集成,加速功能请求、匹配和调用过程,快速响应动态需求;③运营平台化,通过云平台和互联网平台突破装备个体能力局限,实现多类异构装备能力的高效共享与协同,从而为客户提供端到端的优质体验和差异化服务,保持运营效率和灵活性。

### (4) 低碳绿色环境友好

各类装备在推动经济社会快速发展的同时,也在迅速消耗能源和破坏环境。为助力碳达峰、碳中和目标顺利实现,贯彻落实可持续发展战略,要求未来装备提高资源和能源的利用效率,减少污染物产生和排放。

#### 1.2.5 装备报废与回收阶段新需求

报废装备蕴含大量可循环利用的再生资源和对环境极具破坏性的有害物质,装备的报废与回收对于环境保护和经济可持续发展具有重要意义。为进一步提高再生资源回收利用率,降低装备回收成本,要求未来装备:①优化报废决策,从根据固定时限或固定使用次数进行装备报废决策,转变为根据运维历史数据决定装备何时报废,避免装备因过早报废而浪费资源,或因过度使用而产生安全隐患;②完善回收工艺及途径,提高资源回收利用率,降低

资源回收及再利用成本。

## 2 数字孪生装备概念与内涵

### 2.1 从装备到数字孪生装备

上述装备全生命周期各阶段的新需求,可归结为装备对数字化赋能和智能化升级的需求。数字孪生是学术界和业界公认的实现物理实体对象数字化和智能化升级的有效手段之一,近年来不少国内外学者开始开展基于数字孪生的装备设计、制造、运维等方面的研究。作者团队于 2018 年提出了基于数字孪生的复杂装备故障预测与健康健康管理方法<sup>[6]</sup>。

通过分析有关研究,发现基于数字孪生的装备与传统装备的本质区别在于其拥有一个与物理世界完全镜像的信息世界。在信息世界中,装备模型在装备实时数据的驱动下能够精确刻画装备的运行状态,实现装备状态监测(以虚映实)。与此同时,装备还能够与信息空间中进行仿真预测(以虚预实),并基于预测结果对现有决策方案进行优化(以虚优实),最终让装备执行最优的决策方案,实现“以虚控实”。由此可见,信息空间增量对于装备智能化升级具有重要意义,因此,本文基于作者团队前期提出的数字孪生五维模型理论基础<sup>[7]</sup>,对数字孪生装备概念进行探讨。

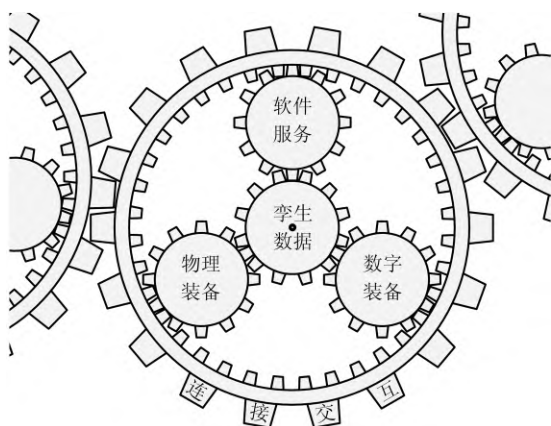
数字孪生装备是一种由物理装备、数字装备、孪生数据、软件服务以及连接交互五个部分<sup>[7]</sup>构成的未来智能装备;数字孪生装备通过融合应用新一代信息技术,促进装备全生命周期各阶段(设计与验证、制造与测试、交付与培训、运维与管控和报废与回收)数智化升级,使得装备具备自感知、自认知、自学习、自决策、自执行、自优化等智能特征和能力;基于装备数字孪生模型、孪生数据和软件服务等,并通过数模联动、虚实映射和一致性交互等机制,实现装备一体化多学科协同优化设计、智能制造与数字化交付、智能运维等,达到拓展装备功能、增强装备性能、提升装备价值的目的。

### 2.2 数字孪生装备组成

由上述定义可知,数字孪生装备由物理装备、数字装备、孪生数据、软件服务以及连接交互五个部分组成<sup>[7]</sup>,如图 1 所示。

#### 2.2.1 物理装备:装备物理实体

物理装备是与物理空间的各要素直接发生作用关系的装备实体部分,由动力、传动、控制和执行等部分组成,负责执行控制指令,并提供实际功能,通



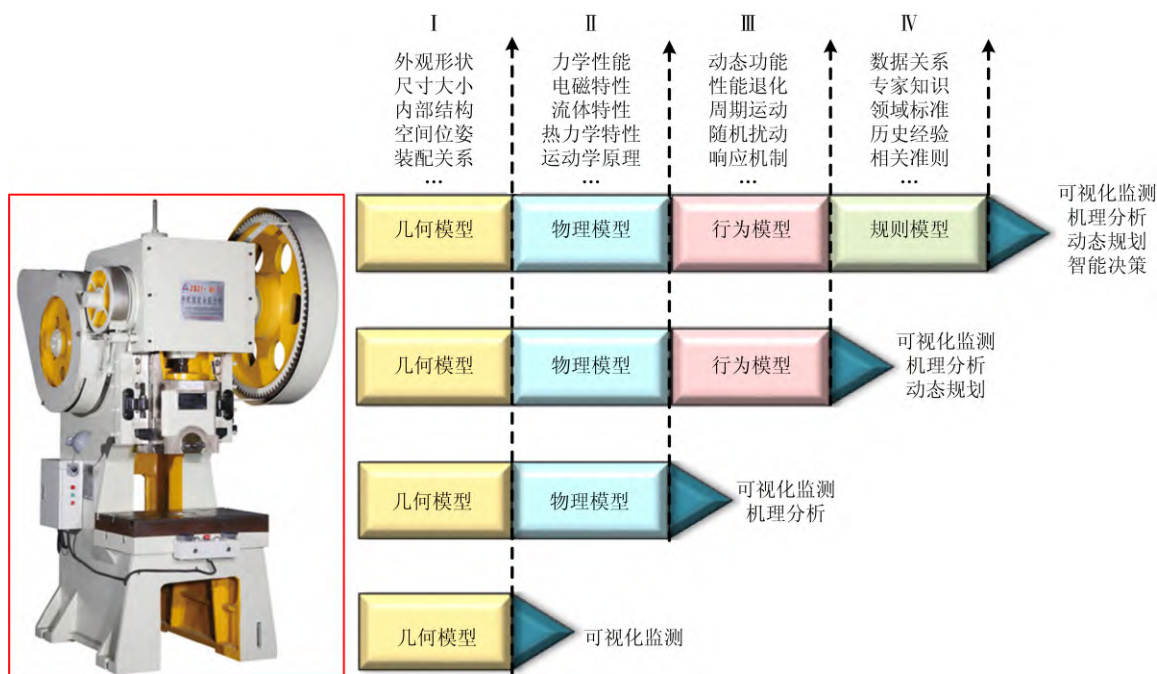
过结合传感器系统,物理装备还可以实现对环境感知。

现有物理装备的相关技术已基本能够支持装备的数字控制、自动执行、网络互联等功能,随着新型材料和先进技术的不断涌现,未来物理装备研究和空间包括但不限于:①可采用结构功能一体化复合材料,支持装备在极端环境下运行,整体优化装

备的耐热性、耐腐蚀性、承载能力、重量等多方面指标;②可结合人因工程,研制用户友好、交互舒适便捷的装备,改善用户体验;③可利用 3D 打印和 4D 打印技术,提高装备设计自由度,支持同类装备的个性化定制生产;④可利用超精密加工技术,减少装备零部件制造公差,进一步提高装备硬件集成度,助力装备小型化和轻量化的实现;⑤可基于功能模块化思想和软硬一体化技术,研制软件定义装备,并实现装备硬件部分可重构,使装备集成更多的功能,以及适应更复杂的任务和环境。

### 2.2.2 数字装备:装备数字孪生模型

由于物理装备受到时间、空间、执行成本等多方面的约束,仅凭借物理手段实现装备的可视化监测、历史状态回溯、运行过程预演、未来结果预测和智能运维等功能难度较大。因此,需要通过构建装备的数字孪生模型,在信息空间中赋予物理装备设计、制造及运维等过程看得见、运行机理看得清、行为能力看得全、运行规律看得透的新能力,如图 2 所示。



从实现和拓展装备各种功能和服务的角度来看,装备数字孪生模型由四类模型组成:①为实现物理装备设计、制造及运维管控等阶段的过程可视化、状态监测与回溯等功能,以及指导物理装备制造阶段的装配和回收阶段的拆卸等过程,需要构建装备

的几何模型来描述物理装备及零部件的外观形状、尺寸大小、内部结构、空间位置与姿态、装配关系等；②为实现装备故障预测、健康管理、质量管控、运行优化等功能，需要构建装备的物理模型来描述物理装备及零部件的力学、电磁学、热力学等多学科属



性,解析装备的运行机理;③为实现装备动态规划和自动化运行,并支持人机协作和多机协作,需要构建装备的行为模型来厘清装备的动态功能、响应机制和周期性运动模式,抽象描述装备性能退化趋势运维环境的随机扰动;④为实现物理装备智能运维和决策优化,需要构建装备的规则模型来显性化表示装备大数据中的隐性信息,形式化表示并集成历史经验、专家知识、领域标准和相关准则。

从装备数字孪生模型产生和表现形式的角度来看,上述四类模型呈现出随时间增量积累和形式多样性的特点。①几何模型主要在装备的设计阶段产生,属于相对静态的模型,几何模型的表现形式包括但不限于三维模型、装配干涉矩阵、曲面方程等;②物理模型主要在装备的设计与验证阶段产生,物理模型的表现形式主要是数学模型,例如描述磁场强度、热传导效应、流体力学等的理论计算公式,物理模型在具体应用时的呈现方式比较丰富,比如有限元分析时的网格模型,以及运动学分析时的连杆模型;③行为模型主要在装备设计、测试和运维阶段产生,是对装备在外部环境干扰、外部输入和内部运行机制共同作用下产生的响应和变化的抽象描述,其表现形式包括有限状态机、图谱、神经网络、统计模型等;④规则模型产生于装备全生命周期各阶段,主要有两类表现形式:一类是通过挖掘分析装备全生命周期数据,揭示其中隐含规则和潜在规律的数据模型,其表现形式主要包括数学模型、神经网络、统计模型等,另一类是通过形式化表达人的经验和知识,使数字孪生装备能够理解并运用人的智慧的模型,其表现形式主要包括数学模型、图谱和结构化文

本等。

数字装备是物理装备在信息空间中的镜像,由物理装备的几何模型、物理模型、行为模型和规则模型融合组装而成<sup>[7]</sup>,负责刻画物理装备的时空几何关系,实时运行状态、行为和过程,描述物理装备的多维属性和运行机理,以及表征装备能力和相关规律规则,是实现装备数字化赋能和智能化升级的核心。

### 2.2.3 孪生数据:装备数字孪生数据

物理装备的设计、制造、测试和运维等过程离不开数据的深度参与,数字装备仿真运行并实现装备可视化监测、历史状态回溯、运行过程预演、故障诊断等功能同样需要数据驱动<sup>[8]</sup>。因此,需要将蕴含装备全生命周期、全流程、全业务有效信息的各类数据进行汇聚与融合,形成装备孪生数据。

孪生数据与数字装备交互联动,相辅相成,共同支持数字孪生装备的各种功能和服务,如图 3 所示。

①装备的尺寸数据、结构数据、空间位置和姿态数据等结合装备的几何模型,能够有效支持装备的状态远程监测、过程参数可视化、历史状态回溯等功能;②装备的材料属性数据、运动数据、工艺数据等结合装备的物理模型,能够有效支持装备的故障预测、健康管理、质量管控等功能;③装备的能力数据、任务数据、运行环境数据等结合装备的行为模型,能够有效支持装备的动态规划和自治运行,以及一定程度的人机协作和多机协作;④装备的运行特征数据、知识数据、经验数据等结合装备的规则模型,能够有效支持装备的自适应控制、调度优化、能量有效运行等智能决策服务。

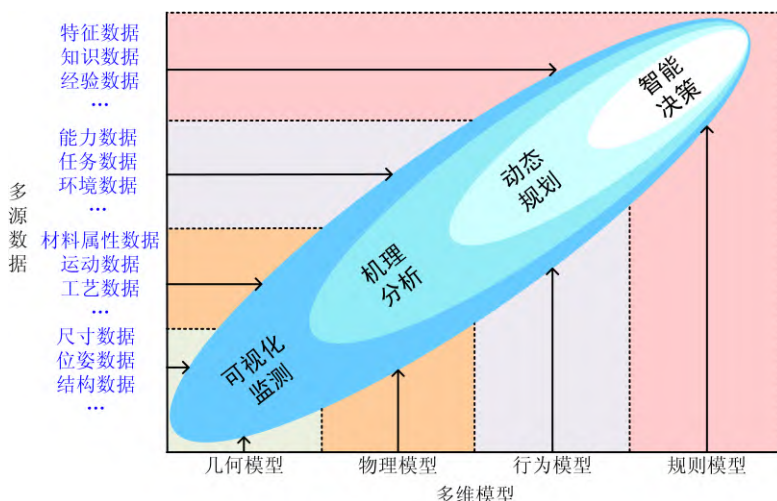


图3 装备数字孪生模型与数据融合映射

孪生数据由物理装备的实际数据、数字装备的仿真数据,以及装备的全生命周期、全流程、全业务虚实融合数据组成,用于对物理装备及其运行过程和环境进行多层次、完整、统一描述或解释,并能够结合装备数字孪生模型实现装备虚实共生<sup>[9]</sup>,以及装备状态动态更新、历史状态追溯、知识挖掘和智能决策等功能和服务。

#### 2.2.4 软件服务:装备软件与服务系统

物理装备、数字装备和孪生数据作为数字孪生装备必不可少的三个部分,分别赋予装备不同方面的能力,但这三个部分并不是一个完整的应用系统,

既难以对其进行高效管理与组织,也无法有效与人交互,为人服务。因此,数字孪生装备需要第四个部分,即软件服务。

软件服务封装并整合物理装备、数字装备和孪生数据的各种功能,面向不同的业务需求,提供具有可请求、可调用、可匹配、可重构、可复用的装备服务,实现装备关系多样化和组织柔性化,从而提供端到端的优质体验和可重构差异化服务,并支持人机交互和平台化集成,使数字孪生装备具备运维高效性、用户友好性、调度灵活性和决策智能性,如图4所示。

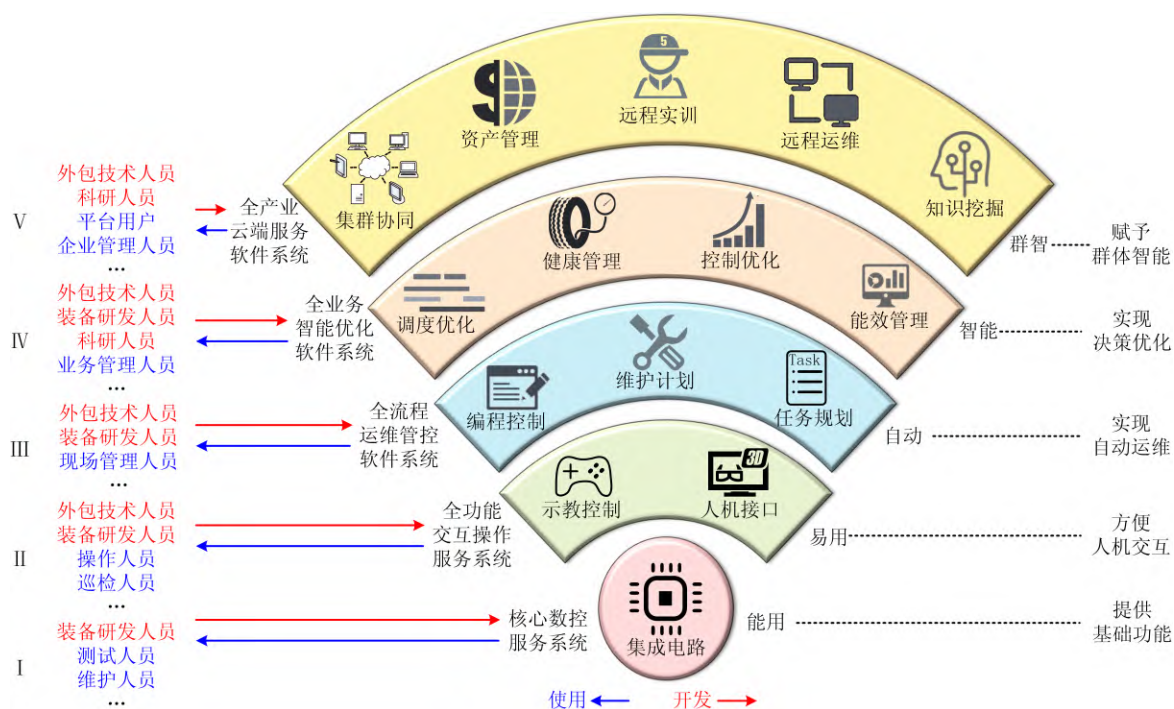


图4 数字孪生装备软件服务

从实现装备各种功能和服务的角度来看,装备软件服务可分为五层:①为实现装备开关机、调试、运行等基础功能,一般考虑将由主机板、单片机、现场可编程逻辑门阵列(FPGA)等集成电路,以及操作系统、控制系统、中断系统等组成的装备核心数控服务系统内嵌于装备;②为方便人机交互过程,可以将装备的基础功能进行封装和集成,形成由示教器、人机接口(HMI)、智能看板等组成的装备全功能交互操作服务系统,以外设的形式独立安装在装备本体外部或装备表面;③为实现装备自动运维,可以将全功能交互操作服务系统中的各种模块化功能以松耦合、可重构、可组合、可调用的形式进一步集成,形成包括提供任务规划、编程控制和维护计划等功能

的全流程运维管控软件系统,并将其部署在本地计算机或服务器上;④为提升装备性能,实现装备的自主优化决策,需要在实现装备自动运维的基础上,面向各种业务需求开发装备调度优化、控制优化、健康管理、能效管理等专业功能,集成为装备全业务智能优化软件系统,并部署在局域网服务器上;⑤为实现面向大型复杂任务的装备集群和智能协作,以及全产业装备的高效管理和知识沉淀,需要创建装备云平台,将全产业智能装备在云端数字化相连,同时,开发并部署包括装备集群协作、资产管理、远程实训、远程运维和知识挖掘等功能的产业云端服务软件系统,并基于全产业装备的数据资产赋予装备群体智能。



从装备软件研制主体和服务对象的角度来看,各层级软件服务对应不同的人群。①因为核心数控服务系统内嵌于装备,且不需要在装备运行时常更新和迭代,所以一般由装备研发人员负责研制,其服务对象主要是在装备制造与测试阶段的测试人员和运维管控阶段的维护人员;②考虑到全功能交互操作服务系统既有可能使用装备配套的原生软件系统,也有可能使用第三方研制的可兼容的软件系统,这一类软件系统的研制一般由装备研发人员或外包公司的技术人员负责,而使用者则主要是参与装备运维过程的操作人员和巡检人员;③全流程运维管控软件系统同样一般是由装备研发人员或外包公司的技术人员负责研制,而服务对象则主要是现场管理人员,例如生产车间的管理者;④因为实现全业务智能优化软件系统的功能难度较大,涉及的问题专业化程度较高,且相关技术尚不成熟,所以该类软件系统不仅需要装备研发人员和外包技术人员的参与,还需要走在科学前沿的科研人员深度参与,该类软件主要是为了更好的服务“不懂技术”的业务管理人员;⑤考虑到全产业云端服务软件系统已经超出单个装备软件服务系统的范畴,该类软件系统的研制过程主要由第三方公司的技术人员和科研人员参与,而其服务的对象则是更加高层的企业管理人员和平台用户。

从装备发展阶段的角度来看,上述五类或五级数字孪生装备软件系统与装备机械化、自动化、数字化、智能化四个发展阶段具有一定相关性。①核心数控服务系统赋予机械化装备数字控制的功能,为实现装备自动化提供基础;②全功能交互操作服务系统针对人机交互问题对装备的数控服务实现进一步的优化;③在此基础上,全流程运维管控软件系统赋予具有数控功能的装备自动化运维的能力;④全业务智能优化软件系统利用装备的数字孪生模型和数据实现装备的智能优化,而这一过程已经属于装备数字化阶段的范畴,并朝着装备智能化的方向演进;⑤全产业云端服务软件系统突出装备产业的特点,在装备智能化的基础上进一步探索装备的协同作业模式,实践和应用装备的群体智能。

#### 2.2.5 连接交互:支撑装备内部、人机与多机的协作交互

连接交互由网络环境、通信协议、输入输出设备及相关技术等组成,作为物理装备、数字装备、孪生数据和软件服务间数据传输的媒介,以及与人和其他

装备协作与交互的桥梁,为实现数字孪生装备时效服务、物理装备远程管控、人机和多机高效协作等提供支持。数字孪生装备的连接交互如图 5 所示。

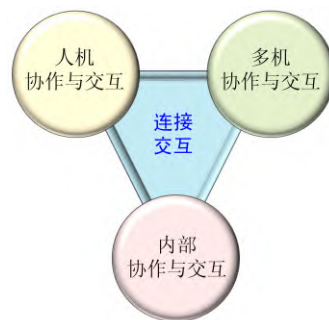


图5 数字孪生装备连接交互

从单个装备的角度来看,物理装备、数字装备、孪生数据和软件服务都需要连接交互来实现各自的功能。①物理装备需要通过连接交互获取软件服务下达的控制策略和指令,从而执行相应的功能,以及通过连接交互同步数字装备的运行状态;②数字装备需要通过连接交互获取物理装备的运行数据,实现物理装备运行状态描述和运行过程复刻,以及通过连接交互获取软件服务下达的仿真控制指令,实现装备仿真预测功能;③软件服务需要通过连接交互获取物理装备运行数据和数字装备仿真数据,从而实现相应的服务功能;④孪生数据需要通过连接交互不断获取和汇聚数字孪生装备的各种数据,从而为装备知识挖掘和异常回溯提供支持<sup>[7]</sup>。

从多机协作的角度来看,需要连接交互连通各类装备。为实现多机协作,应将全部装备视为一个统一的整体,每个装备需要在执行当前运行指令的同时,时刻掌握所有相关装备的任务、状态和运行趋势,因此需要基于数据接口、网络设备和环境实现多机连通,从而实现多机状态、总体任务和全局环境等时效信息的共享和利用。

从人机协作的角度来看,需要连接交互作为人与装备沟通的桥梁。与多机协作不同,对于装备来说,人所具有的灵活性和不确定性远高于任何一类装备,且装备与人语言不同,无法直接交流和沟通。为实现人机协作,人和数字孪生装备必须同步掌握对方的状态和意图,因此需要利用机器视觉、语音识别、脑机接口、牵引示教等技术帮助装备理解人的意图和行为,并基于语音输出、图像输出等硬件设备将数字孪生装备的状态反馈给相关人员,实现装备与人的无障碍沟通,进而支持流畅且智能的人机协作。



## 2.3 数字孪生装备理想特征与理想能力

基于物理装备、数字装备、孪生数据、软件服务和连接交互,数字孪生装备具备以下理想特征(如图6)和理想能力(如图7)。

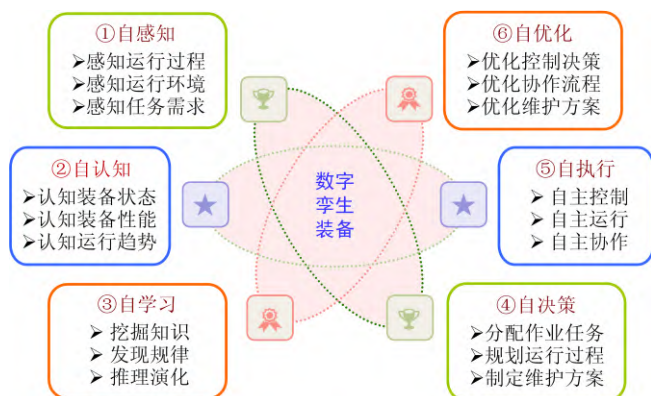


图6 数字孪生装备理想特征

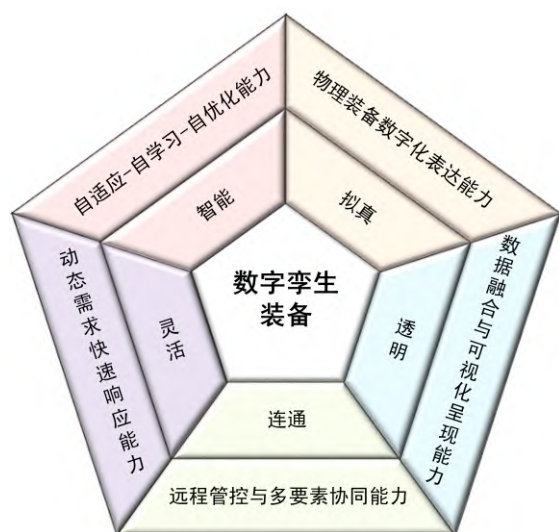


图7 数字孪生装备理想能力

数字孪生装备具有自感知、自认知、自学习、自决策、自执行和自优化六个理想特征。①数字孪生装备基于物理装备部分,可实现对装备运行过程、运行环境和任务需求等的自主感知;②结合装备数字孪生模型和相应的软件服务,可对上述感知数据进行处理和分析,从而实现装备状态、性能和运行趋势的自主认知;③随着装备持续运行,数字孪生装备将积累大量孪生数据,通过对“历史”进行回放和自主学习,数字孪生装备便能够挖掘出一些新知识,发现一些新规律,从而获得自主智能;④在此基础上,数字孪生装备便能够基于自己对作业任务的理解和对自身能力的认知,在运维过程中进行自主决策;⑤并通过连接交互将调度和控制指令传达给物理装备,

实现自动执行;⑥与此同时,数字孪生装备还能够在每次感知、决策、执行的闭环迭代中不断积累经验,并基于数字模型、孪生数据和软件服务进行超实时仿真,在决策方案实际执行前对其进行持续自主优化。

### (1) 物理装备数字化表达能力

数字孪生装备通过对物理装备进行多维度、多层次、多粒度的数字化、语义化描述,能够在信息空间精准重现拟真的物理装备,并从宏观到微观复刻、仿真或预测物理装备的状态和过程。从而在装备制造前,助力装备的一体化协同优化设计与虚拟验证;在装备制成后,支持装备数字化交付与虚拟实训;在装备运行时,为装备运行状态和趋势的分析提供模型基础。以基于数字孪生飞机的虚拟实训为例,飞机的数字孪生模型能够有效支持飞行员的飞行实训,在充分保障飞行员和飞机安全、减少训练成本和能源消耗的前提下,使飞行员积累大量飞行经验。

### (2) 数据融合与可视化呈现能力

数字孪生装备感知、汇聚、融合装备全生命周期数据,获得装备的全方面时效信息,通过将这些信息进行可视化呈现,能够将运行机理复杂,结构复杂,且内部状态和过程不可见的装备变得透明,帮助决策者全面深入了解装备的性能、运行状态及趋势、历史信息、运行环境和任务需求等,有效支持装备的质量检测和溯源、故障预测和诊断等功能的实现<sup>[10]</sup>。以数字孪生风力发电机为例,通过对其轴承振动、转速、受力等数据进行融合分析,能够动态呈现风力发电机运行状态,并超前预测风力发电机的剩余使用寿命,对电力调度优化和风力发电机维护优化提供实质性帮助。

### (3) 远程管控与多要素协同能力

数字孪生装备通过连接交互打通物理空间与信息空间,连通物理装备、数字装备、孪生数据、软件服务四个部分,并能够突破空间距离的限制实现装备远程监控和管理,以及打破人、机、物、环境等多要素间的交互壁垒,实现多要素交互与协同。以数字孪生卫星为例,技术人员能够通过远程可视化的方式全面掌握卫星运行的环境实况、任务需求、运行状态和历史信息,并在此基础上对在轨卫星进行远程管控。

### (4) 动态需求快速响应能力

数字孪生装备软件服务基于可配置、可组装、可重构的装备数字孪生模型,以及可请求、可调用、可

匹配、可迁移、可复用的模块化软件服务,能够实现装备的低代码组态设计、快速重构、动态调度与控制等功能,从而在装备全生命周期各阶段灵活响应动态需求。以数字孪生机床为例,通过为机床数字孪生模型更换刀具数字孪生模型,实现机床数字孪生模型的重构。通过重新定义新刀具的加工轨迹并封装为新的加工服务,实现机床功能的快速更替和拓展,以及对产品加工动态需求的及时响应。

#### (5) 自适应—自学习—自优化能力

数字孪生装备基于多源异构融合数据、多维融合模型以及数模双驱动的仿真运行机制,能够实现任务分解与供需匹配、知识挖掘与推理、仿真推演与预测分析等功能,进而能够自动适应动态环境和业务需求变化,并自发“体验”和不断学习相关规律和规则,使自己的变得更加智能。此外,数字孪生装备还可利用信息空间进行低成本试错和预测仿真,在执行最终决策方案之前将其持续优化。以数字孪生机器人为例,数字孪生机器人不断感知周围环境,并基于对环境数据的融合处理识别、定位并抓取物块,通过多次抓取经历和数次抓取仿真实验,逐渐发现抓取顺序、总能耗、总耗时等之间的隐藏规律,在下一个任务周期中通过优化控制参数,以更小的能耗

和更高的效率完成物块抓取任务。

## 2.4 数字孪生装备关键技术

为实现上述数字孪生装备的理想特征与能力,结合数字孪生技术特点,从数字装备、孪生数据、连接交互、软件服务以及模型和数据双驱动五个角度分析数字孪生装备所需的关键技术,如图 8 所示。主要分为五大类:①物理装备数字化表达相关技术;②数据融合与可视化相关技术;③远程管控与多要素协同相关技术;④动态需求快速响应相关技术;⑤自适应—自学习—自优化相关技术。

(1) 物理装备数字化表达相关技术<sup>[11]</sup>主要包括:①“几何—物理—行为—规则”多维度数字化模型构建技术;②“零件—组件—系统”多层级模型组装技术;③“机—电—液—热—力—磁”等多学科模型融合技术;④数字孪生模型验证技术;⑤数字孪生模型校正技术;⑥数字孪生模型管理技术;⑦多学科多尺度模型仿真技术。

(2) 数据融合与可视化相关技术主要包括:①“清洗—集成—变换—规约”数据预处理技术;②数据特征提取及数据降维技术;③数据更新与动态迭代技术;④数据生成补充技术;⑤数据融合及演化技术;⑥数据可视化技术<sup>[12]</sup>。

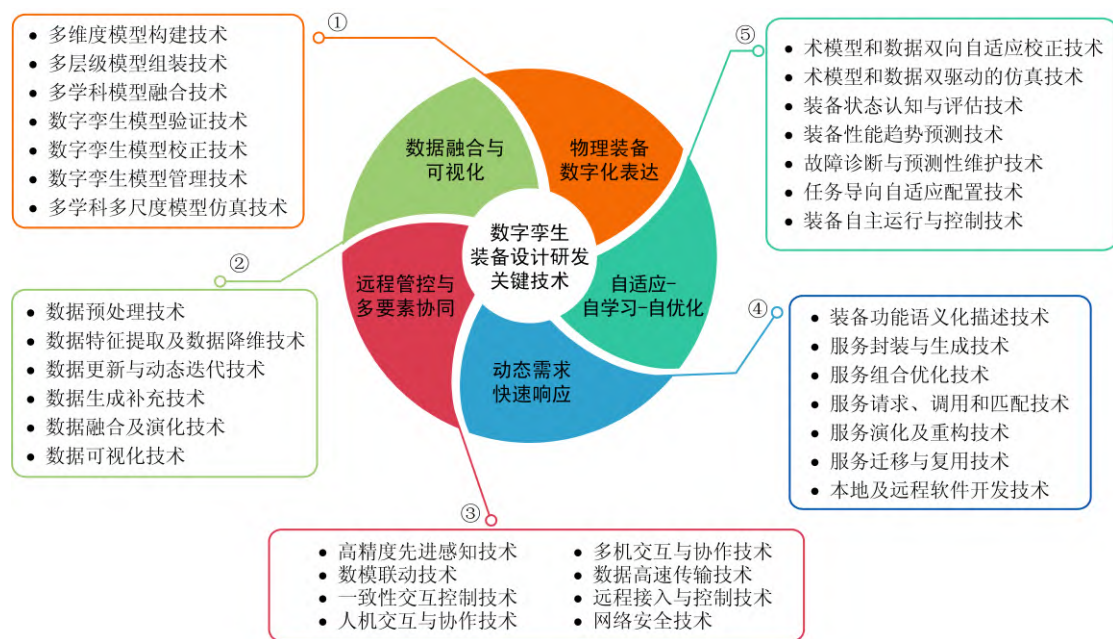


图8 数字孪生装备关键技术

(3) 远程管控与多要素协同相关技术主要包括:①高精度先进感知技术;②数模联动技术;③一致性交互控制技术;④人机交互与协作技术;⑤多机交互

与协作技术;⑥数据高速传输技术;⑦远程接入与控制技术;⑧网络安全技术。

(4) 动态需求快速响应相关技术主要包括:①装



备功能语义化描述技术;②服务封装与生成技术;③服务组合优化技术;④服务请求、调用和匹配技术;⑤服务演化及重构技术;⑥服务迁移与复用技术;⑦本地及远程软件开发技术。

(5)自适应—自学习—自优化相关技术主要包括:①模型和数据双向自适应校正技术;②模型和数据双驱动的仿真技术;③装备状态认知与评估技术;④装备性能趋势预测技术;⑤故障诊断与预测性维

护技术;⑥任务导向自适应配置技术;⑦装备自主运行与控制技术。

### 3 数字孪生装备发展三阶段

实现数字孪生装备不是一蹴而就的。本章将立足当前行业现状,并结合实现数字孪生装备发展的具体需求,提出数字孪生装备发展的三个主要阶段,如图9所示。

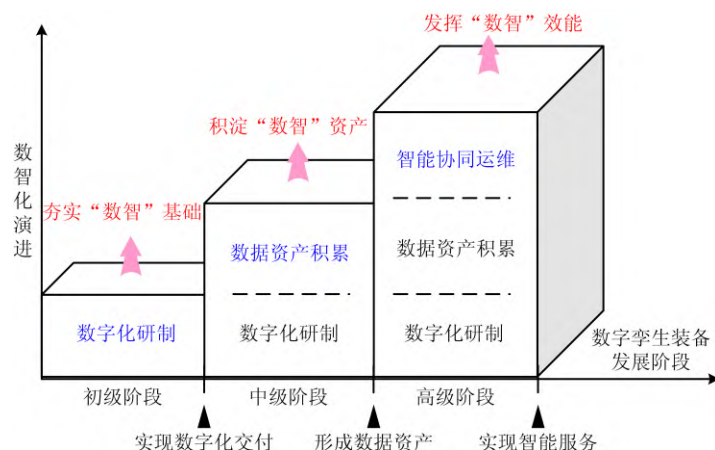


图9 数字孪生装备发展阶段

#### 3.1 初级阶段:数字化设计研制,实现数字化交付

装备数字化交付是指将装备在设计、验证、制造与测试阶段所构建的模型、积累的数据、留存的各类文档等以数字化的形式交付,交付的对象不局限于装备的购买者和使用者,也可以是装备的合作开发商、运营商和售后服务提供商等。

目前,业界已经对产业数字化转型和智能化升级的必要性达成了基本共识,对数据要素重要性的认知程度也在不断提升,不断发展和成熟的新一代信息技术也能够为装备的数字化研制和交付提供有力支持<sup>[13]</sup>。然而,由于我国装备产业体量巨大,各领域装备企业数字化程度参差不齐,在装备设计与验证和制造与测试阶段,仍然存在装备数字化模型缺失、数据匮乏、数字化文档不齐全的问题<sup>[14]</sup>。

装备数字化交付是实现产业数字化转型和智能化升级的基础,也是推动各行业数字孪生装备发展的必要条件。因此,为尽快实现全产业装备达到数字化交付要求的阶段性目标,需全面升级装备研发模式,大力推行并坚持贯彻装备数字化设计与研制。

#### 3.2 中级阶段:数据/模型/知识积累,形成装备数据资产

数字化交付的装备数据、模型和文档,仅仅是装

备全生命周期中的一小部分,装备在运行、维护、回收等过程中产生的海量数据仍然未被充分利用,面向特定需求所构建的各类装备模型依然只能在固定的环境下发挥片面的功能。相关日志和文档耗费大量存储空间,但仅仅是在为人工查阅提供支持,装备本身并不能对其进行直接利用。技术人员、巡检人员和操控人员的知识与经验,不仅装备完全无法理解和利用,而还会随人力资源变动不断流失。

为积累足够的装备数据、模型和知识,实现数字孪生装备智能服务,需要各行业:①充分认知数据资产对于装备智能的重要性,提高装备数据资产积累意识;②为相关装备建立统一、开源、规范的装备模型库、数据库、知识库,实现装备全生命周期数据资产的汇聚与管理;③建立通用算法库,为装备模型的管理和评估、装备数据的预处理和融合以及装备知识的挖掘和表示提供支持。

#### 3.3 高级阶段:数智增值增效,实现装备智能服务

装备智能服务是指装备能够自主感知和辨识用户的显性和隐性需求,并将自身的各种功能封装为安全、高效、绿色、用户友好的服务提供给用户。在智能装备的视角中,用户不再仅限于人,而是泛指所有需要自身某项功能的人、机、料、法、环全要素。例

如,在零件加工过程中,智能机床为人提供零件加工过程可视化服务,为零件提供切削和抛光服务,为下一台继续加工该零件的智能起床提供工艺质量自评估和工艺流程核对服务,为加工车间的节能减排“规定”提供能量有效运行服务,以及为企业业务平台提供自身能力评估和空闲时间窗口预测服务。

数字孪生装备发展高级阶段的主要内容是通过挖掘装备数据资产隐藏价值,赋予数字孪生装备涵盖预见性、灵活性和自适应性等诸多特性的自主智能,并基于云、雾、边、端架构发展数字孪生装备平台化、分布式、服务化运营新模式,面向不同的用户提供端到端的优质体验和可重构差异化智能服务。

## 4 相关实践工作

### 4.1 复材加工车间数字孪生热压罐

航空复合材料对质量要求极高,因此对生产工艺要求极高。热压罐作为航空复合材料制件的主要生产设备,为先进复合材料固化提供高温高压环境。热压罐的稳定运行、精准控制对航空复合材料的生产至关重要。目前针对热压罐的运维大多采用的是定期检修、事后维修的方式,即便采用故障诊断与预测的方式,也常常因为缺乏有效历史故障数据,导致故障诊断与预测精度低的问题。针对该问题,作者团队研究建立了一套数字孪生热压罐健康管控系统,分别从数字热压罐构建、孪生数据生成、孪生数据驱动的热压罐故障诊断与预测,以及复材加工车间数字孪生热压罐健康管控系统开发等方面进行了研究,如图 10 所示<sup>[15-16]</sup>。

#### (1) 热压罐高保真数字孪生模型构建

针对热压罐各个零部件及子系统,分别构建能够表征零部件外形、尺寸、装配关系等的几何模型,表征温度场、压力场、应力与形变等的物理模型,表征热压罐动态功能、部件性能退化、外部扰动等的行为模型,表征领域知识、维护准则、故障及次品规律的规则模型,从而得到一个能够完整、真实刻画物理热压罐的高保真数字孪生模型。

#### (2) 基于数字热压罐的孪生数据生成

热压罐的故障诊断与预测需要大量带标签数据进行训练,而从物理热压罐上采集到的有效故障数据远远不足。为解决该问题,基于热压罐高保真数字孪生模型进行仿真运行,得到大量有效且能够反映热压罐故障特征的仿真数据,为热压罐故障诊断与预测提供支持。

#### (3) 基于虚实融合数据的故障诊断与预测

通过对物理热压罐数据和基于数字热压罐仿真生成的数据进行筛选、清洗、归一化等预处理操作,并对预处理后的数据进行关联与演化分析,用于对基于神经网络的故障诊断与预测模型进行训练,提高故障诊断与预测的精度。

#### (4) 复材加工车间数字孪生热压罐故障诊断与健康管理系统开发

通过集成以上功能和服务,作者团队开发了一套复材加工车间数字孪生热压罐故障诊断与健康管控系统,其功能模块包括:①热压罐运行数据监测,实时掌握热压罐的运行状态;②数字孪生模型管理,支持热压罐数字孪生模型的查看、修改、增加、删除等功能;③孪生数据生成,为故障模型提供数据支持;④热压罐故障诊断与预测,实现基于虚实融合数据的故障实时诊断,以及故障和寿命预测<sup>[15-16]</sup>。

### 4.2 纺织车间数字孪生物流装备

纺织车间中存在大量装备,占地面积大、工序多、转运流程多。车间物流装备的自动化、数字化、智能化是实现纺织业由劳动密集型向自动化(少)人化转变的关键。当前普遍存在以下不足:①装备运行监控二维平面化,缺乏所见即所得的监控手段;②装备之间的协作易失败;③装备远程运维难实现;④装备故障多,且难以提前预测并及时处置;⑤物流作业策略缺乏自适应调度。针对上述不足,作者团队建立了纺织车间数字孪生物流装备运维管控系统,分别从纺织车间物流装备数字孪生模型构建、数据采集与虚实交互、虚拟运行与调试、远程运维、故障诊断与预测等方面进行了相关研究,如图 11 所示。

#### (1) 所见即所得的三维可视化监控

针对纺织车间物流装备的不同维度,分别构建每一个车间物流装备的三维几何模型、物理属性模型、行为特征模型、约束规则模型,并进一步开展“零件—组件—装备”数字孪生模型组装,以及多学科领域模型的融合,从而得到与实际物流装备“完全一致”的高保真模型。此外,构建车间物流装备数据采集网络,可实时、高速感知物流装备控制器的所有数据,包括物流装备的状态信息、作业信息、货物信息和报警信息等,并保存至物理装备运维管控系统的数据库中,并通过将获取到的实时数据与构建的车间物流装备数字孪生模型相关联,实现物理装备的信息空间与物理空间实时同步,最终实现所见即所得的物流装备三维立体可视化监控。



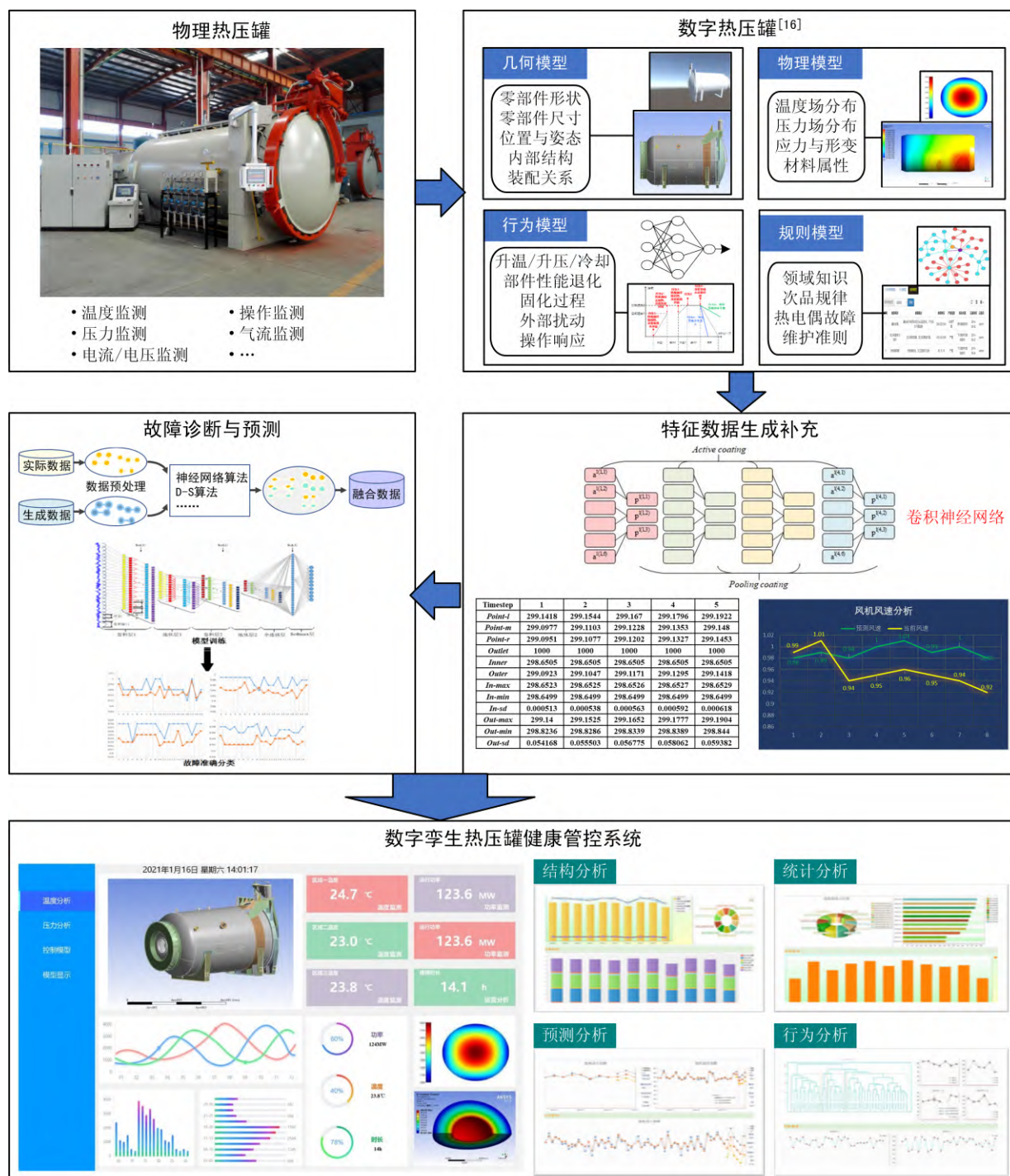


图10 复材加工车间数字孪生热压罐及其健康管控系统

## (2) 车间物流装备虚拟仿真与历史过程复现

基于构建的车间物流装备物理模型、行为模型和规则模型,可以在该系统中开展车间物流装备的虚拟仿真运行,从而可以验证物流装备的关键性能指标和制定的运输方案。此外,可以基于数据库中存储的历史运行数据,实现历史运输过程和状态的复现,以及历史故障与异常问题的追溯,从而能够更

好的发现和分析车间物流过程中的问题。

## (3) 车间物流装备远程运维管控

构建的纺织车间物流装备运维管控数字孪生系统支持 PC、手机或 PAD 等多终端运行。一方面支持用户通过多种终端实时三维可视化查看车间物流装备运行状态、作业信息、产品信息等;另一方面支持用户通过多种终端对装备运行参数、作业任务、作

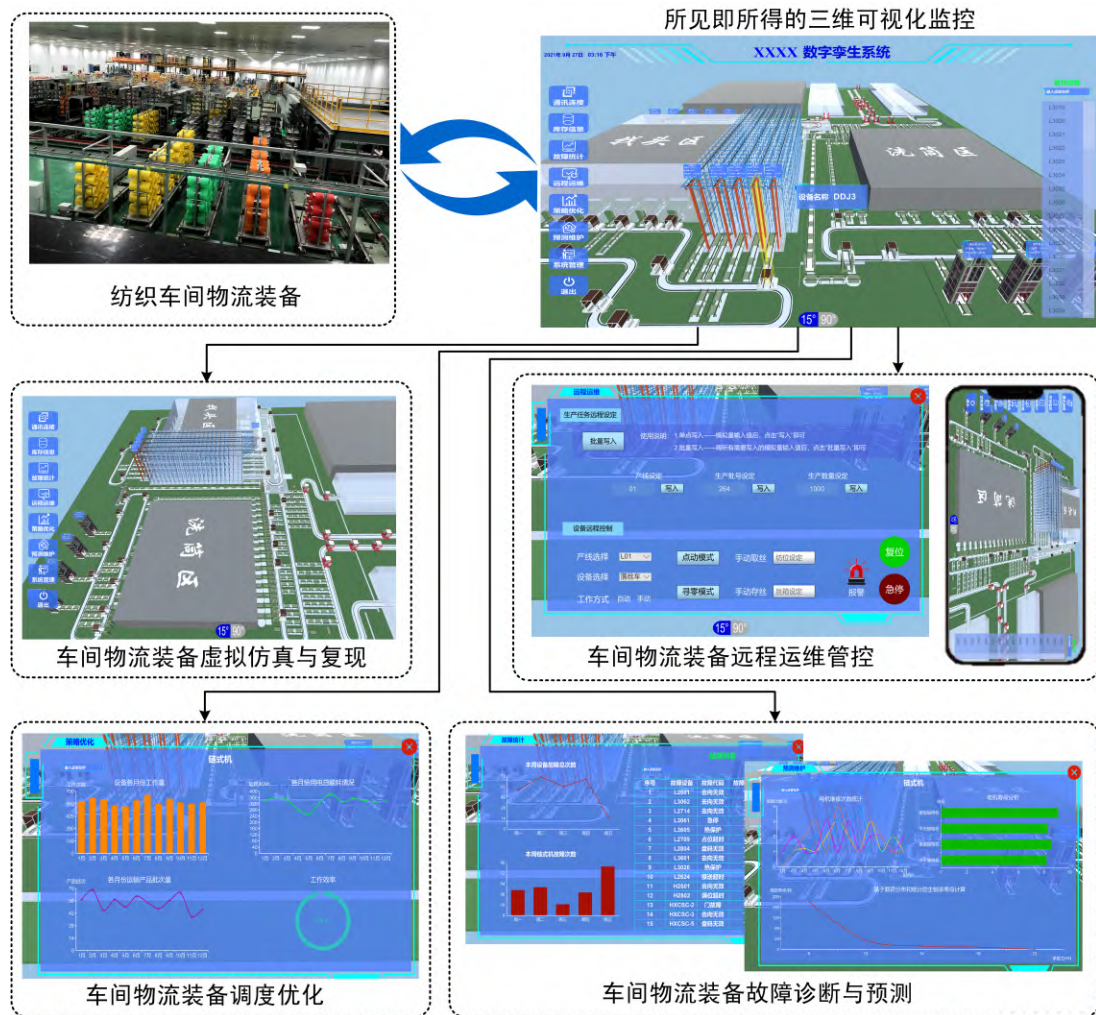


图11 纺织车间数字孪生物流装备及管控系统

业策略进行远程设定。

#### (4) 车间物流装备作业调度优化

物流装备之间的协作运行以及高效的作业策略是保障车间物流稳定、高效运行的关键。作者团队分别针对立体仓库单元、环形穿梭车单元构建了物流作业策略自适应调度算法,包括操作时间预测、任务序列优化。一方面支持用户在实际生产之前开展车间虚拟运行测试;另一方面,在用户允许的情况下,在车间实际运行过程中对物流作业策略进行实时自适应调度优化,从而提高车间作业效率。

#### (5) 车间物流装备故障诊断与预测。

构建涵盖“物理—电气—液压—能耗—控制”的物流装备数字孪生模型,结合实时和历史数据,设计了数字孪生模型与数据混合驱动的物流装备故障诊断与预测方法,大幅度提高了车间物流装备故障预测精度,减少了装备停机时间,从而提升了车间物流效率。

## 5 结束语

对现有各类装备进行数字化赋能和智能化升级,是加快数字化发展、建设数字中国的基本前提,对于打造数字经济新优势,以及应对经济全球化和疫情常态化等一系列挑战具有重要意义。本文分析了未来智能装备的全生命周期新需求,并结合数字孪生理念提出了数字孪生装备的概念,以期数字孪生装备能够作为未来智能装备的一种典型范式,对现有装备的创新升级起到参考和推进作用。

本文对数字孪生装备的组成、理想特征与理想能力、关键技术和发展阶段进行了初步探讨,并介绍了数字孪生装备研发及应用实践探索成功案例。后续本文作者团队将进一步结合国家、社会和企业对于装备数字化和智能化的实际需求,完善数字孪生装备架构体系、标准体系和技术体系,同时深入研究和探讨数字孪生装备高效运行和精准维护方法。文



章内容难免有不足之处,恳请国内外专家和同行批评指正。

## 致谢

本文研究工作得到国家自然科学基金项目(52120105008,52005026)的支持。除所列作者外,北航数字孪生研究组其他成员也参与了本文的讨论,在此一并表示感谢。感谢董景辰、张相木、汪宏、叶猛、黄祖广、陈虎等专家对本文相关内容的讨论和指导。感谢刘强、宁振波、赵敏、朱铎先和林雪萍等专家对本文数字孪生装备软件服务分类组成图(图4)的指导。

本文相关内容先后在2021年中国纺织机械行业科技大会(2021年9月14日,杭州)、2021年第九届航天技术创新国际会议(2021年10月14日,杭州)、2021年全国先进生产系统理论与应用研讨会(2021年11月6日,西安)、2021年第一届中国国际透平机械产业联盟前沿科技大会(2021年10月26日,沈阳)、2021年第17届中国CAE年会仿真与数字孪生技术论坛(2021年11月14日,海口)、2021年第七届中国虚拟现实产学研大会(2021年12月5日,北京)等会议上进行了汇报和交流。在此感谢为相关工作提出宝贵建议的国内外学者与工业界同行。

## 参考文献:

- [1] Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Intelligent manufacturing development plan in 14th Five-Year[EB/OL]. (2021-12-28)[2022-01-02]. [https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2021/art\\_1c779648523c40f3a0e2ea044ff8f24b.html](https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2021/art_1c779648523c40f3a0e2ea044ff8f24b.html) (in Chinese). [中华人民共和国工业和信息化部.“十四五”智能制造发展规划[EB/OL]. (2021-12-28)[2022-01-02]. [https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2021/art\\_1c779648523c40f3a0e2ea044ff8f24b.html](https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2021/art_1c779648523c40f3a0e2ea044ff8f24b.html).]
- [2] State Council. Notice of the State Council on printing and distributing the plan for the development of strategic emerging industries of the state in the 12th Five-Year[EB/OL]. (2012-07-20)[2021-09-01]. [http://www.gov.cn/zwgk/2012-07/20/content\\_2187770.htm](http://www.gov.cn/zwgk/2012-07/20/content_2187770.htm)(in Chinese). [国务院. 国务院关于印发“十二五”国家战略性新兴产业发展规划的通知[EB/OL]. (2012-07-20)[2021-09-01]. [http://www.gov.cn/zwgk/2012-07/20/content\\_2187770.htm](http://www.gov.cn/zwgk/2012-07/20/content_2187770.htm).]
- [3] Xinhua News Agency. The 14th Five-Year Plan[EB/OL]. (2021-03-13)[2021-09-01]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm)(in Chinese). [新华社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-03-13)[2021-09-01]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm).]
- [4] Xinhua News Agency. Grasping the development trend and laws of digital economy to promote the healthy development of China's digital economy[EB/OL]. (2021-10-20)[2021-09-01]. <https://m.gmw.cn/baijia/2021-10/20/35244868.html> (in Chinese). [新华社. 把握数字经济发展趋势和规律 推动我国数字经济健康发展[EB/OL]. (2021-10-20)[2021-09-01]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-10/19/content\\_5643653.htm?jump=true](http://www.gov.cn/xinwen/2021-10/19/content_5643653.htm?jump=true).]
- [5] TAO Fei, ZHANG Chenyuan. Digital twin boosts the integration and development of the digital economy and the real economy[N]. Xinhuanet, 2021-04-24(in Chinese). [陶飞, 张辰源. 数字孪生助力数字经济与实体经济融合发展[N]. 新华网, 2021-04-24.]
- [6] TAO Fei, ZHANG Meng, LIU Yushan, et al. Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment[J]. CIRP Annals, 2018, 67(1): 169-172.
- [7] 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(in Chinese). [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.]
- [8] 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(in Chinese). [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.]
- [9] LI Peigen. Elementary introduction of digital twin[EB/OL]. (2020-08-11)[2021-09-01]. [https://www.thepaper.cn/newsDetail\\_forward\\_8682551](https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_8682551), 2020-08-11(in Chinese). [李培根. 浅说数字孪生[EB/OL]. (2020-08-11)[2021-09-01]. [https://www.thepaper.cn/newsDetail\\_forward\\_8682551](https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_8682551), 2020-08-11.]
- [10] 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). [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.]
- [11] 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). [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.]
- [12] ZHANG Meng, TAO Fei, HUANG Biqing, et al. Digital twin data: Methods and key technologies[J]. Digital Twin, 2021, 1(2): 2. DOI:10.12688/digitaltwin.17467.1.
- [13] TAO Fei, ZHANG He, QI Qinglin, et al. Ten questions towards digital twin: Analysis and thinking[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2020, 26(1): 1-17(in Chinese). [陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生十问: 分析与思考[J].

- 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 1-17. ]
- [14] TAO Fei, QI Qinglin. Make more digital twins[J]. Nature, 2019, 573: 490-491.
- [15] TAO Fei, QI Qinglin, ZHANG Meng, et al. Digital twin and its practice in shop-floor[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2021 (in Chinese). [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. ]
- [16] WANG Yucheng, TAO Fei, ZHANG Meng, et al. Digital twin enhanced fault prediction for the autoclave with insufficient data[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 60 (2021): 350-359.

### 作者简介:

陶 飞(1981—), 男, 湖北武汉人, 北京航空航天大学教授, 博士, 博士生导师, 研究方向: 数字孪生、智能制造、绿色可持续制造, E-mail: ftao@buaa.edu.cn;

张辰源(1995—), 男, 河南郑州人, 北京航空航天大学博士研究生, 研究方向: 数字孪生、车间及装备运行优化;

张 贺(1995—), 男, 吉林四平人, 北京航空航天大学博士研究生, 研究方向: 数字孪生、工业互联网;

程江峰(1987—), 男, 山东烟台人, 北京航空航天大学博士后, 研究方向: 面向服务的智能制造、数字孪生车间智能互联技术;

邹孝付(1987—), 男, 安徽明光人, 北京航空航天大学副研究员, 研究方向: 软硬一体化数据处理理论与应用、数字孪生;

徐 慧(1981—), 女, 湖北襄阳人, 北自所(北京)科技发展有限公司副总经理, 研究方向: 机械工程及自动化;

王 勇(1972—), 男, 北京人, 北自所(北京)科技发展股份有限公司总经理, 研究方向: 工业企业自动化;

谢兵兵(1965—), 男, 湖南长沙人, 北京机械工业自动化研究所有限公司总工程师, 研究方向: 工业自动化、智能制造。