

DOI:10.13196/j.cims.2017.04.010

# 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势

庄存波,刘检华,熊 辉<sup>+</sup>,丁晓宇,刘少丽,瓮 刚

(北京理工大学 机械与车辆学院数字化制造研究所,北京 100081)

**摘 要:**数字孪生技术被认为是实现信息物理系统的核心关键技术,作为数字孪生技术在产品研发过程具体应用的产品数字孪生体,目前其研究尚处于探索阶段,研究成果相对较少且缺乏系统性。为此首先回顾了数字孪生体的产生背景,在此基础上提出了数字孪生技术的概念,然后对产品数字孪生体的内涵进行了系统阐述,建立了产品数字孪生体的体系结构,并给出了产品数字孪生体在产品阶段、制造阶段和服务阶段的实施途径,最后指出了产品数字孪生体的发展趋势。

**关键词:**数字孪生技术;数字孪生体;虚实融合;数字纽带;智能制造;信息物理系统;产品全生命周期管理;建模与仿真

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

## Connotation, architecture and trends of product digital twin

ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, XIONG Hui<sup>+</sup>, DING Xiaoyu, LIU Shaoli, WENG Gang

(Laboratory of Digital Manufacturing, School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Digital twin technology is considered as the core and crucial technology to fulfill cyber-physical systems. Product digital twin is one of applications of digital twin technology in the process of product development. However, the research on it is still in its infancy and there are only few unsystematic research findings presented. The concept of digital twin technology based on review of digital twin background and the architecture for product digital twin based on systematic analysis of its connotation were proposed. The implementation approach of product digital twin in the stage of product design, manufacturing and service was investigated. The evolving trends of product digital twin concerning its features in the future were predicted.

**Keywords:** digital twin technology; digital twin; cyber and physical convergence; digital thread; intelligent manufacturing; cyber-physical systems; product lifecycle management; modeling and simulation;

## 0 引言

20世纪中叶以来,随着微电子、自动化、计算机、通讯、网络、信息、人工智能等高新技术的迅猛发展,掀起了以信息革命为核心的新技术革命浪潮。数字化制造就是在这样一个背景下应运而生的。广义的数字化制造技术是将信息技术应用于产品设计、制造和管理等产品全生命周期中,以达到提高产

品研发效率和质量、降低研发成本、实现快速响应市场的目的所涉及的一系列活动的总称。通常,数字化制造包括数字化设计、数字化工艺、数字化加工、数字化装配、数字化管理、数字化检测和数字化实验等。

从20世纪50年代的数控加工开始,数字化制造技术的发展大致经历了以下4个主要阶段:

(1)以计算机辅助设计(Computer Aided De-

收稿日期:2017-03-03;修订日期:2016-10-24。Received 03 Mar. 2017; accepted 24 Oct. 2016.

基金项目:国防基础科研资助项目(JCKY2016204A502, JCKY2016203B106)。Foundation items: Project supported by the National Defense Fundamental Research Foundation, China(No. JCKY2016204A502, JCKY2016203B106).

sign, CAD)/计算机辅助工艺规划(Computer Aided Process Planning, CAPP)/计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing, CAM)等计算机辅助技术为代表的第一代数字化制造技术(从 20 世纪 60 年代至 80 年代初期),即单项技术和局部系统的应用阶段。该阶段以数控技术、CAD、CAPP、CAM、计算机辅助工程(Computer Aided Engineering, CAE)、计算机辅助测试(Computer Aided Test, CAT)、成组技术、物料需求计划(Material Requirement Planning, MRP)/制造资源计划(Manufacturing Resource Planning, MRP II)等单项技术及柔性制造系统为主要内容。该阶段以计算机作为主要技术工具和手段进行产品设计、分析、工艺规划与制造并处理各种信息,以提高产品研发效率和质量。

(2)以集成制造技术为代表的第二代数字化制造技术(20 世纪 80 年代至 90 年代前期),即由信息集成、功能集成和过程集成构成的企业级集成应用阶段。该阶段以计算机集成制造系统(Computer Intergrated Mannufacturing System, CIMS)为代表,通过信息和过程集成来解决单元技术发展造成的信息孤岛问题。同时在该阶段,为减少串行设计方法带来的大量返工问题,美国国防分析研究院提出了并行工程的思路,随后出现了虚拟制造等制造模式。

(3)以网络化制造技术为代表的第三代数字化制造技术(20 世纪 90 年代至 21 世纪 10 年代初期)。该阶段以敏捷制造、供应链管理、电子商务为主要内容进行企业间的集成应用,通过产品设计制造的协同来提高制造业的竞争力。

(4)以智能制造技术为代表的第四代数字化制造技术(21 世纪 10 年代至今)。该阶段以实现高效、优质、柔性、清洁、安全生产,提高企业对市场的快速响应能力和国际竞争力为目标。智能制造的概念诞生于 20 世纪 80 年代,但在该阶段才得到广泛重视和快速发展,2015 年作为我国未来十年实施制造强国战略的行动纲领和未来三十年实现制造强国梦的奠基性文件——《中国制造 2025》中明确提出:“智能制造是新一轮科技革命的核心,也是制造业数字化、网络化、智能化的主攻方向”。传统的数字化制造技术主要强调产品全生命周期的数字化技术的应用,并没有特别强调人工智能技术的应用。事实上,智能制造技术的提出和发展,已经超出了数字化

制造技术的范畴,它是制造技术与数字化技术、智能技术及新一代信息技术的融合。同时在该阶段出现了“工业 4.0”(2013 年德国联邦教研部与联邦经济技术部在汉诺威工业博览会上提出),其内涵是利用信息物理系统(Cyber-Physical Systems, CPS)将生产中的供应、制造和销售等信息数据化、智慧化,最后达到快速、有效、个性化的产品供应,其本质是通过充分利用 CPS 将制造业推向智能化的转型。

从上述数字化制造技术的发展历程来看,数字化制造技术的关键问题之一是数据的管理问题,从最初的产品模型数据管理发展到车间现场的制造数据乃至整个产品全生命周期的数据管理。随着基于模型的定义(Model Based Definition, MBD)、产品数据管理(Product Data Management, PDM)、模型轻量化技术的日趋成熟,目前产品模型的数据表达日趋完善,而产品制造过程和产品服务过程的数据管理问题日益凸显出来,尤其是随着国内外制造企业研发生产过程中的自动化、数字化、智能化水平的逐步提高,以及大数据、物联网、移动互联网、云计算等新一代信息与通信技术的快速普及与应用,制造数据来源和数据量剧增,如何实现产品全生命周期中多源异构动态数据的有效融合与管理、实现产品研发生产中各种活动的优化决策,已经成为亟待解决的问题,在此背景下,数字孪生体(Digital Twin)逐渐引起国内外学者的关注。

本文首先回顾了数字孪生体的产生背景,对数字孪生技术、数字孪生体和产品数字孪生体等概念及内涵进行了系统阐述,在此基础上建立了产品数字孪生体的体系结构,并给出了产品数字孪生体在产品设计阶段、制造阶段和服务阶段的实施途径,最后指出了产品数字孪生体的发展趋势。

## 1 数字孪生体的产生与演化

“孪生体/双胞胎(twins)”概念在制造领域的使用,最早可追溯到美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的阿波罗项目<sup>[1]</sup>。在该项目中,NASA 需要制造两个完全相同的空间飞行器,留在地球上的飞行器称为孪生体(twin),用来反映(或作镜像)正在执行任务的空间飞行器的状态/状况。在飞行准备期间,被称为孪生体的空间飞行器广泛应用于训练;在任务执行期间,使用留在地球上的孪生体进行仿真实验,该孪生体尽可能精确地反映和预测正在执行任务的空

间飞行器的状态,从而辅助太空轨道上的航天员在紧急情况下做出最正确的决策。从这个角度可以看出,孪生体实际上是通过仿真,实时反映真实运行情况的样机或模型。它具有两个显著特点:①孪生体与其所要反映的对象在外表(指产品的几何形状和尺寸)、内容(指产品的结构组成及其宏观微观物理特性)和性质(指产品的功能和性能)上基本相同;②允许通过仿真等方式来镜像/反映真实的运行情况/状态。需要指出的是,此时的孪生体还是实物。

2003年,Michael Grieves教授在密歇根大学的产品全生命周期管理(Product Lifecycle Management, PLM)课程上提出了“与物理产品等价的虚拟数字化表达”的概念<sup>[2]</sup>,并给出定义:一个或一组特定装置的数字复制品,能够抽象表达真实装置并可以此为基础进行真实条件或模拟条件下的测试。该概念源于更清晰地表达装置的信息和数据的期望,希望能够将所有的信息放在一起进行更高层次的分析。虽然这个概念在当时并没有称为数字孪生体(在2003~2005年被称为“镜像的空间模型(mirrored spaced model)<sup>[3]</sup>”,2006~2010年被称为“信息镜像模型(information mirroring model)<sup>[4]</sup>”),但是其概念模型却具备数字孪生体的所有组成要素,即物理空间、虚拟空间以及两者之间的关联或接口,因此可以被认为是数字孪生体的雏形。2011年,Michael Grieves教授在《几乎完美:通过PLM驱动创新和精益产品》<sup>[5]</sup>一书中引用了其合作者John Vickers描述该概念模型的名词——数字孪生体,并一直沿用至今<sup>[6]</sup>。其概念模型如图1所示,包括3个主要部分:①物理空间的实体产品;②虚拟空间的虚拟产品;③物理空间和虚拟空间之间的数据和信息交互接口<sup>[2]</sup>。

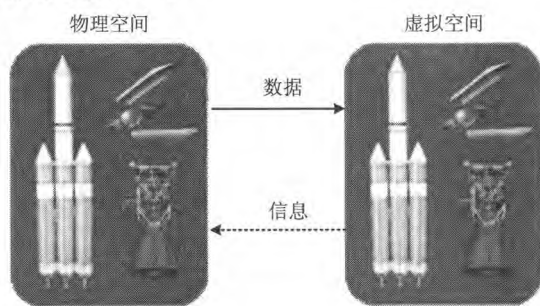


图1 数字孪生体的概念模型<sup>[2]</sup>

这个概念模型从以下几个方面极大地拓展了阿波罗项目中的“孪生体”:①将孪生体数字化,采用数字化的表达方式建立了一个与产品物理实体在外

表、内容和性质相同的虚拟产品;②引入虚拟空间,建立了虚拟空间和物理空间的关联,使两者之间可以进行数据和信息的交互;③形象直观地体现了虚实融合、以虚控实的理念;④对该概念进行扩展和延伸,除了产品以外,针对工厂、车间、生产线、制造资源(工位、设备、人员、物料等),在虚拟空间都可以建立相应的数字孪生体。

但是,该概念和模型在2003年提出时并没有引起国内外学者们的重视,主要是因为:①当时在生产过程中收集产品相关信息的技术手段有限,大多采用人工方式和基于纸质文件,尤其是难以实现生产数据的在线实时采集;②物理产品的数字化描述尚不成熟,相关的软硬件无法支持在虚拟空间中精确定义和描述实体产品的相关属性和行为;③当时的计算机性能和算法难以实现对大数据的实时处理,移动通信技术也不够成熟,虚实之间的数据实时传输难以实现。

2011年之后,数字孪生体迎来了新的发展契机。2011年数字孪生体由美国空军研究实验室提出并得到了进一步发展,目的是解决未来复杂服役环境下的飞行器维护问题及寿命预测问题<sup>[7]</sup>。他们计划在2025年交付一个新型号的空间飞行器以及与该物理产品相对应的数字模型即数字孪生体,其在两方面具有超写实性:①包含所有的几何数据,如加工时的误差;②包含所有的材料数据,如材料微观结构数据。2012年,美国空军研究实验室提出了“机体数字孪生体”的概念<sup>[8]</sup>;机体数字孪生体作为正在制造和维护的机体的超写实模型,是用来对机体是否满足任务条件进行模拟和判断的。由许多子模型组成的集成模型,如图2所示。

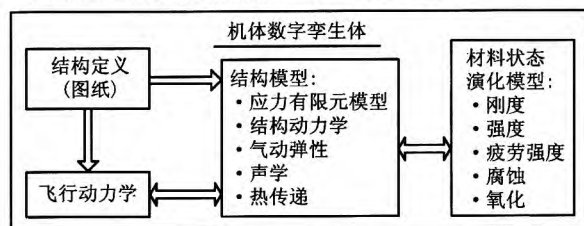


图2 机体数字孪生体的组成元素<sup>[8]</sup>

机体数字孪生体是单个机身在整个产品生命周期的一致性模型和计算模型,它与制造和维护飞行器所用的材料、制造规范及流程相关联。它也是飞行器数字孪生体的子模型,其中飞行器数字孪生体是一个包含电子系统模型、飞行控制系统模型、推进系统模型和其他子系统模型的集成模型。此时,数

字孪生体从概念模型阶段步入初步的规划与实施阶段,对其内涵、性质的描述和研究也更加深入,具体表现在:①突出了数字孪生体的层次性和集成性,例如飞行器数字孪生体、机体数字孪生体、机体结构模型、材料状态演化模型等,有利于数字孪生体的逐步实施及最终实现;②突出了数字孪生体的超写实性,包括几何模型、物理模型、材料演化模型等;③突出了数字孪生体的广泛性,即包括整个产品全生命周期,并从设计阶段延伸至后续的产品制造阶段和产品服务阶段;④突出了数字孪生体在产品全生命周期的一致性,体现了单一数据源的思想;⑤突出了数字孪生体的可计算性,可以通过仿真和分析来实时反映对应产品实体的真实状态。

2012 年,面对未来飞行器轻质量、高负载以及更加极端环境下更长服役时间的需求,NASA 和美国空军研究实验室合作并共同提出了未来飞行器的数字孪生体范例。他们针对飞行器、飞行系统或运载火箭等,将数字孪生体定义为:一个面向飞行器或系统的、集成的多物理、多尺度、概率仿真模型,它利用当前最好的可用物理模型、更新的传感器数据和历史数据等来反映与该模型对应的飞行实体的状态<sup>[9]</sup>。同年,NASA 发布的“建模、仿真、信息技术和处理”路线图中,数字孪生体被正式带入公众的视野<sup>[10]</sup>。该定义可以认为是美国空军实验室和 NASA 对其之前研究成果的一个阶段性总结,着重突出了数字孪生体的集成性、多物理性、多尺度性、概率性等特征,主要功能是能够实时反映与其对应的飞行产品的状态(延续了早期阿波罗项目“孪生体”的功能),使用的数据包括当前最好的可用产品物理模型、更新的传感器数据以及产品组的历史数据等。

2015 年,美国通用电气公司计划基于数字孪生体,并通过其自身搭建的云服务平台 Predix,采用大数据、物联网等先进技术,实现对发动机的实时监控、及时检查和预测性维护<sup>[11]</sup>。2017 年,为实现制造车间物理世界与信息世界的交互融合,陶飞等<sup>[12]</sup>提出了数字孪生车间的实现模式,并明确了其系统组成、运行机制、特点和关键技术,为制造车间 CPS 的实现提供了理论和方法参考。

可以看出,最近几年来,数字孪生体在理论层面和应用层面均取得了快速发展,同时应用范围也逐渐从产品设计阶段向产品制造和运维服务等阶段转移,并引起了国内外学者和企业的广泛关注,其原因

主要在于以下几方面:

(1)模型轻量化、MBD、基于物理的建模等模型数字化表达技术的兴起和广泛应用,使得采用数字化方式在产品全生命周期各阶段精确描述物理产品成为可能。

(2)大数据、物联网、移动互联网、云计算等新一代信息与通信技术的快速普及与应用,大规模计算、高性能计算、分布式计算等计算机科学技术的快速发展,以及机器学习、深度学习等智能优化算法的不断涌现,使得产品动态数据的实时采集、可靠与快速传输、存储、分析、决策、预测等成为可能,为虚拟空间和物理空间的实时关联与互动提供了重要的技术支撑。

## 2 产品数字孪生体的内涵

从数字孪生体的起源和发展现状来看,其应用主要集中在产品设计和运维阶段的数字孪生体范畴,但是随着大数据、物联网、移动互联网、云计算等新一代信息与通信技术的快速普及与应用,以及当前各国先进制造战略如德国工业 4.0、美国工业互联网战略和中国制造 2025 等的提出,数字孪生体已经超出了其传统的产品设计和运维阶段的数字孪生体范畴。为便于理解数字孪生体,本文给出了数字孪生、数字孪生体、数字孪生模型和产品数字孪生体的定义。

数字孪生是指利用数字技术对物理实体对象的特征、行为、形成过程和性能等进行描述和建模的过程和方法,也称为数字孪生技术。数字孪生体是指与现实世界中的物理实体完全对应和一致的虚拟模型,可实时模拟自身在现实环境中的行为和性能,也称为数字孪生模型。一些学者也将数字孪生体翻译为数字镜像、数字映射、数字孪生、数字双胞胎等。可以说,数字孪生是技术、过程和方法,数字孪生体是对象、模型和数据。数字孪生技术不仅可利用人类已有理论和知识建立虚拟模型,而且可利用虚拟模型的仿真技术探讨和预测未知世界,来发现和寻找更好的方法和途径、不断激发人类的创新思维、不断追求优化进步,因此,数字孪生技术为当前制造业的创新和发展提供了新的理念和工具。

未来在虚拟空间将存在一个与物理空间中的物理实体对象完全一样的数字孪生体,例如,物理工厂在虚拟空间有对应的工厂数字孪生体,物理车间在虚拟空间有对应的车间数字孪生体,物理生产线在

虚拟空间有对应的生产线数字孪生体等。

产品数字孪生体作为数字孪生技术在产品研发过程中最重要的应用之一,目前其研究尚处于探索阶段,研究成果相对较少且缺乏系统性。本文总结了国内外关于产品数字孪生体的相关研究成果,并结合多年的研究基础提出产品数字孪生体的内涵体系框架如图3所示。

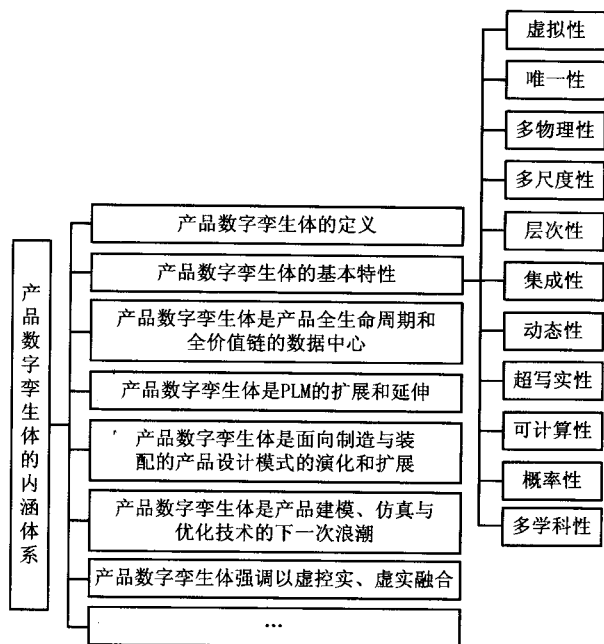


图3 产品数字孪生体的内涵体系框架

#### (1) 产品数字孪生体的定义

综合考虑已有的产品数字孪生体的演化过程和相关解释,给出产品数字孪生体的定义如下:产品数字孪生体是指产品物理体的工作进展和工作状态在虚拟空间的全要素重建及数字化映射,是一个集成的多物理、多尺度、超写实、动态概率仿真模型,可用来模拟、监控、诊断、预测、控制产品物理体在现实环境中的形成过程、状态和行为。产品数字孪生体基于产品设计阶段生成的产品模型,并在随后的产品制造和产品服务阶段,通过与产品物理体之间的数据和信息交互,不断提高自身的完整性和精确度,最终完成对产品物理体的完全和精确描述。

通过产品数字孪生体的定义可以看出:①产品数字孪生体是产品物理体在信息空间中集成的仿真模型,是产品物理体的全生命周期数字化档案,并可实现产品全生命周期数据和全价值链数据的统一集成管理;②产品数字孪生体是通过与产品物理体之间不断进行数据和信息交互而完善的;③产品数字孪生体的最终表现形式是产品物理体的完

整和精确的数字化描述;④产品数字孪生体可用来模拟、监控、诊断、预测和控制产品物理体在现实物理环境中的形成过程和状态。

产品数字孪生体远远超出了数字样机(或虚拟样机)和数字化产品定义的范畴,产品数字孪生体不仅包含产品几何、功能和性能方面的描述,还包含产品制造或维护过程等其他全生命周期中的形成过程和状态的描述。数字样机也称虚拟样机,是指对机械产品整机或具有独立功能的子系统的数字化描述,其不仅反映了产品对象的几何属性,还至少在某一领域反映了产品对象的功能和性能<sup>[13]</sup>。数字化样机形成于产品设计阶段,可应用于产品的全生命周期,包括工程设计、制造、装配、检验、销售、使用、售后、回收等环节。而数字化产品定义是指对机械产品功能、性能和物理特性等进行数字化描述的活动。从数字样机(或虚拟样机)和数字化产品定义的内涵看,其主要侧重于产品设计阶段的产品几何、功能和性能方面的描述,没有涉及产品制造或维护过程等其他全生命周期阶段的形成过程和状态的描述。

#### (2) 产品数字孪生体的基本特性

产品数字孪生体具有多种特性,主要包括虚拟性、唯一性、多物理性、多尺度性、层次性、集成性、动态性、超写实性、可计算性、概率性和多学科性。

1) 虚拟性 产品数字孪生体是产品物理体在信息空间的数字化映射模型,是一个虚拟模型,属于信息空间(或虚拟空间),不属于物理空间。

2) 唯一性 一个物理产品对应一个产品数字孪生体。

3) 多物理性 产品数字孪生体是基于物理特性的实体产品数字化映射模型,不仅需要描述实体产品的几何特性(如形状、尺寸、公差等),还需要描述实体产品的多种物理特性,包括结构动力学模型、热力学模型、应力分析模型、疲劳损伤模型以及产品组成材料的刚度、强度、硬度、疲劳强度等材料特性。

4) 多尺度性 产品数字孪生体不仅描述物理产品的宏观特性,如几何尺寸,也描述物理产品的微观特性,如材料的微观结构、表面粗糙度等。

5) 层次性 组成最终产品的不同组件、部件、零件等,都可以具有其对应的数字孪生体,例如:飞行器数字孪生体包括机架数字孪生体、飞行控制系统数字孪生体、推进控制系统数字孪生体等,从而有利于产品数据和产品模型的层次化和精细化管理,以

及产品数字孪生体的逐步实现。

6)集成性 产品数字孪生体是多种物理结构模型、几何模型、材料模型等的多尺度、多层次集成模型,有利于从整体上对产品的结构特性和力学特性进行快速仿真与分析。

7)动态性(或过程性) 产品数字孪生体在全生命周期各阶段会通过产品物理实体的不断交互而不断改变和完善,例如:在产品制造阶段采集的产品制造数据(如检测数据、进度数据)会反映在虚拟空间的数字孪生体中,同时基于数字孪生体能够实现对产品制造状态和过程的实时、动态和可视化监控。

8)超写实性 产品数字孪生体与物理产品在外观、内容、性质上基本完全一致,拟实度高,能够准确反映物理产品的真实状态。

9)可计算性 基于产品数字孪生体,可以通过仿真、计算和分析来实时模拟和反映对应物理产品的状态和行为。

10)概率性 产品数字孪生体允许采用概率统计的方式进行计算和仿真。

11)多学科性 产品数字孪生体涉及计算科学、信息科学、机械工程、电子科学、物理等多个学科的交叉和融合,具有多学科性。

(3)产品数字孪生体是产品全生命周期和全价值链的数据中心

产品数字孪生体以产品为载体,涉及产品全生命周期,从概念设计贯通到详细设计、工艺设计、制造以及后续的使用、维护和报废/回收等阶段。一方面,产品数字孪生体是产品全生命周期的数据中心,其本质的提升是实现了单一数据源和全生命周期各阶段的信息贯通;另一方面,产品数字孪生体也是全价值链的数据中心,其本质的提升在于无缝协同,而不仅是共享信息,这就是一种全价值链的协同<sup>[14]</sup>。如异地跨区域跨时区厂商的协同设计和开发、与上下游进行装配的仿真、在客户的“虚拟”使用环境中测试/改进产品等。

(4)产品数字孪生体是 PLM 的扩展和延伸

PLM 强调通过产品物料清单(包括设计物料清单(Material of Bill, BOM)、工艺 BOM、制造 BOM、销售 BOM 等,以及彼此之间的关联)实现对产品全生命周期数据的管理。产品数字孪生体不但强调通过单一产品模型贯通产品全生命周期各阶段信息,从而为产品开发、产品制造、产品使用和维护、工程更改以及协同合作厂商提供单一数据源,而且将产

品制造数据和产品服务数据等与产品模型关联,使得企业可以更加高效地利用产品数据来优化和改进产品的设计,同时还可以预测和控制产品实体在现实环境中的形成过程及状态,从而真正形成全价值链数据的统一管理和有效利用,因此产品数字孪生体是对 PLM 的扩展和延伸。

(5)产品数字孪生体是面向制造与装配的产品设计模式的演化和扩展

传统的面向制造与装配的设计模式(Design for Manufacture and Assembly, DFM&A),通过设计和工艺一体化,在设计过程中将制造过程的各种要求和约束(包括加工能力、经济精度、工序能力等)融合至设计建模过程中,采用有效的建模和分析手段来保证设计结果制造的方便和经济<sup>[15]</sup>。产品数字孪生体同样支持在产品阶段就通过建模、仿真及优化手段来分析产品的可制造性,同时还支持产品性能和产品功能的测试与验证,并通过产品历史数据、产品实际制造数据和使用维护数据等来优化和改进产品的设计,其目标之一也是面向产品全生命周期的产品设计,是 DFM&A 的一种演化和扩展。

(6)产品数字孪生体是产品建模、仿真与优化技术的下一次浪潮<sup>[16]</sup>

在过去几十年间,仿真技术被限制为一个计算机工具,用来解决特定的设计和工程问题。美国在“2010 年及其以后的美国国防制造业”计划中,将基于建模和仿真的设计工具列为优先发展的 4 种重点能力之一。近年来,随着基于模型的系统工程(Model-based System Engineering, MBSE)的出现和发展,产品建模与仿真技术获得了新的发展,其核心概念是“通过仿真进行交流”,目前仿真技术仍然被认为是产品开发部门的一个工具。随着产品数字孪生体的出现和发展,仿真技术将作为一个核心的产品/系统功能应用到随后的生命周期阶段,如在实体产品之前完成交付、仿真驱动辅助的产品使用支持等<sup>[16]</sup>。产品数字孪生体将促进建模、仿真与优化技术无缝集成到产品全生命周期中的各个阶段,例如通过与产品使用数据的直接关联来支持产品的使用和服务等,促进产品建模、仿真与优化技术的进一步发展。

(7)产品数字孪生体强调以虚控实,虚实融合

产品数字孪生体的基本功能是反映/镜像对应产品实体的真实状态和真实行为,达到虚实融合、以



虚控实的目的。一方面,数字孪生体根据实体空间传来的数据进行自身的数据完善、融合和模型构建;另一方面,通过展示、统计、分析与处理这些数据来实现对实体产品及其周围环境的实时监控和控制。

值得指出的是,虚实深度融合是实现以虚控实的前提条件。产品实体的生产是基于虚拟空间的产品模型定义,而虚拟空间产品模型的不断演化以及决策的生成都是基于在实体空间采集并传递而来的数据开展的。

### 3 产品数字孪生体与数字纽带

伴随着产品数字孪生体,美国空军研究实验室和 NASA 也同时提出了数字纽带(Digital Thread,也译为数字主线、数字线程、数字线、数字链等)的概念。Kraft 提出的数字纽带<sup>[17]</sup>是一种可扩展、可配置的企业级分析框架。在整个系统的生命周期中,通过提供访问、整合以及将不同/分散数据转换为可操作信息的能力来通知决策制定者。数字纽带可无缝加速企业数据—信息—知识系统中的权威/发布数据、信息和知识之间的可控制相互作用,并允许在能力规划和分析、初步设计、详细设计、制造、测试以及维护采集阶段动态实时地评估产品在当前和未来提供决策的能力。数字纽带也是一个允许可连接数据流的通信框架,并提供了一个包含生命周期各阶段孤立功能视图的集成视图。数字纽带为在正确的时间将正确的信息传递到正确的地方提供了条件,使得产品生命周期各环节的模型能够及时进行关键数据的双向同步和沟通。“工业 4.0”术语编写组对数字细节的定义为:利用先进建模和仿真工具构建的,覆盖产品全生命周期与全价值链,从基础材料、设计、工艺、制造以及使用维护全部环节,集成并驱

动以统一的模型为核心的产品设计、制造和保障的数字化数据流<sup>[18]</sup>。

通过分析这些概念可以发现,数字纽带为产品数字孪生体提供了访问、整合和转换能力,其目标是贯通产品生命周期和价值链,实现全面追溯、双向共享/交互信息、价值链协同。由此可见,产品数字孪生体是对象、模型和数据,数字纽带是方法、通道、链接和接口;通过数字纽带可以交换、处理产品数字孪生体的相关信息<sup>[14]</sup>。产品数字孪生体与数字纽带的关系如图 4 所示。

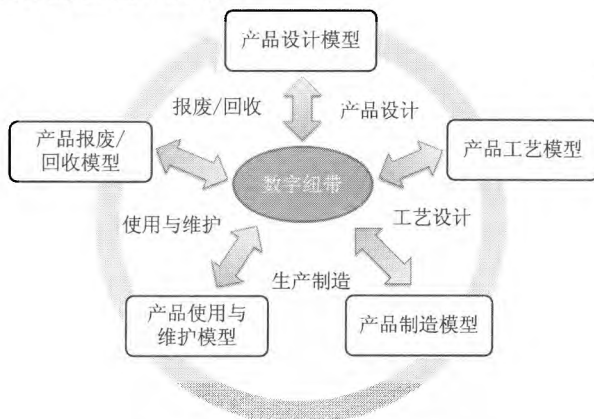


图4 产品数字孪生体与数字纽带的关系图

以产品设计和制造过程为例,建立如图 5 所示的融合了数字孪生体和数字纽带的应用示例。从图中可见,仿真分析模型的参数可以传递到产品定义的全三维模型,再传递到数字化生产线加工/装配成真实的物理产品,继而通过在线的数字化检验/测量系统反映到产品定义模型中,进而反馈到仿真分析模型中。通过数字纽带实现了产品生命周期阶段间的模型和关键数据双向交互,使产品生命周期各阶段的模型保持一致,最终实现闭环的产品全生命周期数据管理和模型管理<sup>[19]</sup>。

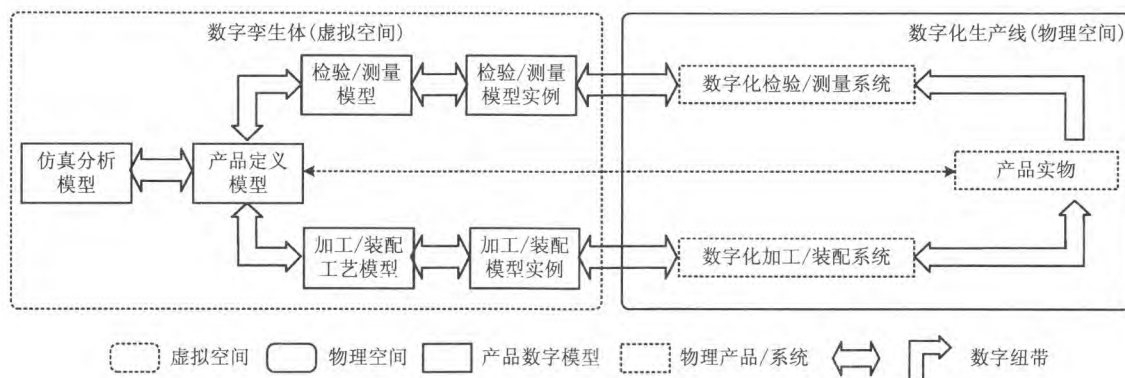


图5 融合了数字孪生体和数字纽带的应用示例

在具体应用上,美国 F35 战斗机的设计与生产就是采用数字孪生体和数字纽带技术实现了前所未有的工程设计与制造的连接,它意味着设计阶段产生的 3D 精确实体模型可以用于加工模拟、NC 编程、坐标测量机检测、模具/工装的设计和制造等。另外,3D 数字纽带的数据存储在 PDM 系统中,世界各地的合作伙伴、厂商和供应商都可以无缝使用<sup>[20]</sup>。这也是单一数据源,通过统一的数据,不仅可以实现产品设计与生产制造的无缝连接、降低现场出现工程更改的次数、提高研制效率、实现数据的高效组织和集成管理,也可以实现协同的仿真和分析,上下游企业可以一起进行仿真和分析,从而提高效率、减少返工<sup>[14]</sup>。

#### 4 信息物理系统与数字孪生体

2006 年,美国国家科学基金会(National Science Foundation, NSF)首先提出 CPS 的概念,也可译为网络—实体系统或信息物理融合系统。CPS 被定义为由具备物理输入输出且可相互作用的元件组成的网络,它不同于未联网的独立设备,也不同于没有物理输入输出的单纯网络<sup>[21]</sup>。2013 年,德国提出了“工业 4.0”,其核心技术就是 CPS。CPS 是一个综合计算、通信、控制、网络和物理环境的多维复杂系统,以大数据、网络与海量计算为依托,通过 3C(Computing, Communication, Control)技术的有机融合与深度协作,实现大型工程系统的实时感知、动态控制和信息服务<sup>[22]</sup>。2017 年 3 月,工信部发布了《信息物理系统白皮书》,指出 CPS 是支撑两化深度融合的综合技术体系,是推动制造业与互联网融合发展的重要抓手。CPS 将人、机、物互联,将实体与虚拟对象双向连接,以虚控实、虚实融合。CPS 内涵中的虚实双向动态连接有两个步骤:①虚拟的实体化,如设计一件产品时,首先进行模拟和仿真,然后制造出来;②实体的虚拟化,实体在制造、使用、运行的过程中,将状态反映到虚拟端,通过虚拟方式进行监控、判断、分析、预测和优化<sup>[14]</sup>。

CPS 通过构筑信息空间与物理空间数据交互的闭环通道,能够实现信息虚体与物理实体之间的交互动。数字孪生体的出现为实现 CPS 提供了清晰的思路、方法和实施途径。以物理实体建模产生的静态模型为基础,通过实时数据采集、数据集成和监控,动态跟踪物理实体的工作状态和工作进展(如采集测量结果、追溯信息等),将物理空间中的物理实体在信息空间进行全要素重建,形成具有感知、

分析、决策、执行能力的数字孪生体。因此,数字孪生体是 CPS 的核心关键技术。

#### 5 产品数字孪生体的体系结构

目前国内外对产品数字孪生体的系统性研究成果较少,下面从产品全生命周期的角度分析产品数字孪生体的数据组成、实现方式、作用及目标,提出一种产品数字孪生体的体系结构,如图 6 所示。

##### 5.1 产品数字孪生体的数据组成

产品数字孪生体的数据组成主要包括产品设计数据、产品工艺数据、产品制造数据、产品服务数据以及产品退役和报废数据等。各部分具体的数据组成如下:①产品设计数据,包括产品设计模型、产品设计 BOM、产品设计文档等;②工艺设计数据,包括工艺模型、工艺 BOM、工艺文档信息(如工艺卡片、检验/测量要求、关键工序质量控制卡、物料配套表)等;③产品制造数据,包括制造 BOM、质量数据、技术状态数据、物流数据、检测数据、生产进度数据、逆向过程数据等;④产品服务数据,包括产品使用数据、产品维护数据、产品升级数据、产品使用过程监控数据、产品健康预测与分析数据等;⑤产品报废或回收数据,包括产品报废数据、产品回收数据等。

需要指出的是,产品数字孪生体不是一个静态模型,而是一个过程模型和动态模型,会随着数据的产生而不断演化。

##### 5.2 产品数字孪生体的实现方式

基于产品全生命周期的阶段划分,产品数字孪生体的实现方式大致可分为以下五步<sup>[14]</sup>:

(1)产品设计阶段 构建一个全三维标注的产品模型,包括三维设计模型+产品制造信息(Product Manufacturing Information, PMI)+关联属性等,PMI 包括物理产品的几何尺寸、公差,以及 3D 注释、表面粗糙度、表面处理、焊接符号、技术要求、工艺注释和材料明细表等,关联属性包括零件号、坐标系统、材料、版本、日期等。

(2)工艺设计阶段 在三维设计模型+PMI+关联属性的基础上,实现基于三维产品模型的工艺设计,具体实现步骤包括三维设计模型转换、三维工艺过程建模、结构化工艺设计、基于三维模型的工装设计、三维工艺仿真验证以及标准库的建立,最终形成基于数模的工艺规程(Model Based Instructions, MBI),具体包括工艺 BOM+三维工艺仿真动画+关联的工艺文字信息和文档。



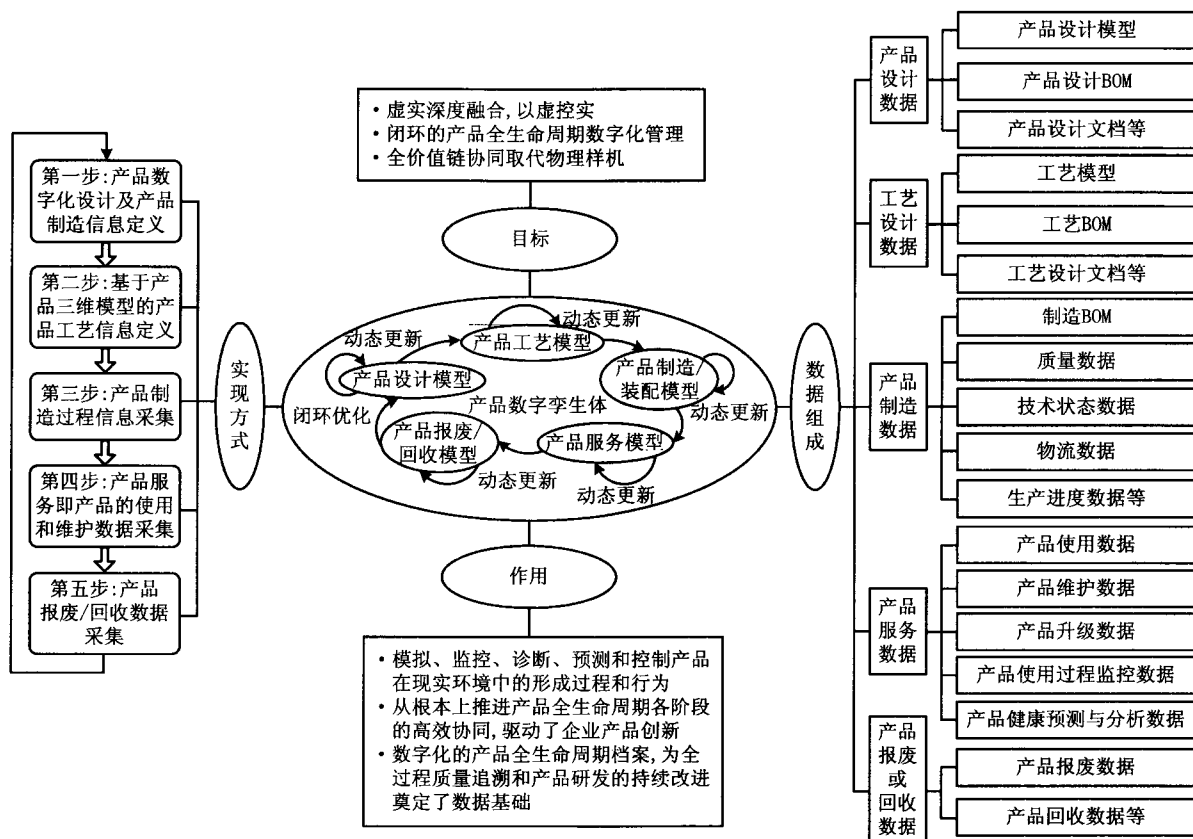


图6 产品数字孪生体的体系结构

(3) 产品生产制造阶段 主要实现产品档案(Product Memory)或产品数据包(Product Data Package)即制造信息的采集和全要素重建,包含制造BOM(Manufacture BOM, MBOM)、质量数据、技术状态数据、物流数据、产品检测数据、生产进度数据、逆向过程数据等的采集和重建。

(4) 产品服务阶段 主要实现产品的使用和维护(Operations and Sustainment, O&S), Operations主要是指操作, Sustainment既包括维修、保养,也包括升级和改造。

(5) 产品报废/回收阶段 主要记录产品的报废/回收数据,包括产品报废/回收原因、产品报废/回收时间、产品实际寿命等。当产品报废/回收后,该产品数字孪生体所包含的所有模型和数据都将成为同种类型产品组历史数据的一部分进行归档,为下一代产品的设计改进和创新、同类型产品的质量分析及预测、基于物理的产品仿真模型和分析模型的优化等提供数据支持。

综上所述,产品数字孪生体的实现方法有如下特点:①面向产品全生命周期,采用单一数据源实现物理空间和信息空间的双向连接;②产品档案要确

保产品所有的物料都可以追溯(例如实做物料<sup>[24]</sup>),也要能够实现质量数据(例如实测尺寸、实测加工/装配误差、实测变形)、技术状态(例如技术指标实测值、实做工艺等)的追溯;③在产品制造完成后的服务阶段,仍要实现与物理产品的互联互通,从而实现对物理产品的监控、追踪、行为预测及控制、健康预测与管理等,最终形成一个闭环的产品全生命周期数据管理。

### 5.3 产品数字孪生体的作用

产品数字孪生体的主要作用如下:

(1) 模拟、监控、诊断、预测和控制产品在现实环境中的形成过程和行为

产品数字孪生体的主要作用之一就是模拟、监控、诊断、预测和控制物理产品在现实环境中的形成过程和行为。

1) 模拟 以航空航天领域为例,在空间飞行器执行任务以前,使用空间飞行器数字孪生体,在搭建的虚拟仿真环境中模拟飞行器的任务执行过程,尽可能掌握飞行器在实际服役环境中的状态、行为、任务成功概率、运行参数以及一些在设计阶段没有考虑/预料到的问题,并为后续的飞行任务制定、飞行

任务参数确定以及面对异常情况时的决策制定提供依据<sup>[10]</sup>。可以通过改变虚拟环境的参数设置来模拟飞行器在不同服役环境时的运行情况;通过改变飞行任务参数来模拟不同飞行任务参数对飞行任务成功率、飞行器健康和寿命等产生的影响;也可以用来模拟和验证不同的故障、降级和损坏减轻策略对提高产品健康和服役寿命的有效性等。

2) 监控和诊断 在产品制造/服务过程中,制造/服务数据(如最新的产品制造/使用状态数据、制造/使用环境数据)会实时地反映在产品数字孪生体中。通过产品数字孪生体可以实现对物理产品制造/服务过程的动态实时可视化监控,并基于所得的实测监控数据和历史数据实现对物理产品的故障诊断、故障定位等。

3) 预测 通过构建的产品数字孪生体,可以在虚拟空间中对产品的制造过程、功能和性能测试过程进行集成的模拟、仿真和验证,预测潜在的产品设计缺陷、功能缺陷和性能缺陷。针对这些缺陷,支持产品数字孪生体中对应参数的修改,在此基础上对产品的制造过程、功能和性能测试过程再次进行仿真,直至问题得到解决。借助于产品数字孪生体,企业相关人员能够通过对产品设计的不断修改、完善和验证来避免和预防产品在制造/使用过程中可能会遇到的问题。在产品制造阶段,将最新的检验和测量数据、进度数据、关键技术状态参数实测值等关联映射至产品数字孪生体,并基于已有的基于物理属性的产品设计模型、关键技术状态参数理论值以及预测分析模型(如精度预测与分析模型、进度预测与分析模型),实时预测和分析物理产品的制造/装配进度、精度和可靠性。在产品服务阶段,以飞行器为例,将最新的实测负载、实测温度、实测应力、结构损伤程度以及外部环境等数据关联映射至产品数字孪生体,并基于已有的产品档案数据、基于物理属性的产品仿真和分析模型,实时准确地预测飞行器实体的健康状况、剩余寿命、故障信息等。

4) 控制 在产品制造/服务过程中,通过分析实时的制造过程数据,实现对产品质量和生产进度的控制,通过分析实时的服务数据实现对物理产品自身状态和行为的控制,包括外部使用环境的变更、产品运行参数的改变等。

(2) 从根本上推进产品全生命周期各阶段的高效协同,驱动企业产品创新

通过数字纽带技术,在产品全生命周期各阶

段,将产品开发、产品制造、产品服务等各个环节数据在产品数字孪生体中进行关联映射,在此基础上以产品数字孪生体为单一产品数据源,实现产品全生命周期各阶段的高效协同,最终实现虚拟空间向物理空间的决策控制,以及数字产品到物理产品的转变。另外,基于统一的产品数字孪生体,通过分析产品制造数据和产品服务数据,不仅能够实现对现实世界物理产品状态的实时监控,为用户提供及时的检查、维护和维修服务,还可以通过对客户需求和偏好的预测、对产品损坏原因的分析等,为设计人员改善和优化产品设计提供依据。同时,基于产品数字孪生体和数字纽带技术,可实现对产品设计数据、产品制造数据和产品服务数据等产品全生命周期数据的可视化统一管理,并为产品全生命周期各阶段所涉及的工程设计和分析人员/生产管理人员/操作人员/供应链上下游企业人员/产品售后服务人员/产品用户等提供统一的数据和模型接口服务。

另外,Michael Grieves 教授<sup>[5]</sup>也指出,数字孪生体的出现,使得企业能够在产品实物制造以前就在虚拟空间中模拟和仿真产品的开发、制造和使用过程,避免或减少了产品开发过程中存在的物理样机试制和测试过程,能够降低企业进行产品创新的成本、时间及风险,解决了企业开发新产品通常会面临的成本、时间和风险三大问题,极大地驱动了企业进行产品创新的动力。产品数字孪生体将使企业更加注重和实践产品创新,产品创新将成为企业未来的主要核心竞争力。

(3) 数字化的产品全生命周期档案,为全过程质量追溯和产品研发的持续改进奠定了数据基础

产品数字孪生体是产品全生命周期的数据中心,记录了产品从概念设计直至报废/回收的所有模型和数据,是物理产品在全生命周期的数字化档案,反映了产品在全生命周期各阶段的形成过程、状态和行为。产品数字孪生体实时记录了产品从出生到消亡的全过程,并且在产品所处的任何阶段都能够调用该阶段以前所有的模型和数据,产品在任何时刻、任何地点和任何阶段都是状态可视、行为可控、质量可追溯的。例如在产品使用阶段,产品数字孪生体在产品设计和制造阶段的所有数据和模型记录集合能够为产品质量追溯、产品可靠性分析提供准确的模型和数据来源。

## 5.4 产品数字孪生体的目标

(1) 虚实深度融合和以虚控实 产品数字孪生体

的思想之一就是要在虚拟空间为物理空间的每个产品实体建立一个数字复制品,并采用建模和仿真分析等手段,通过产品数字孪生体来模拟和反映对应物理产品的状态和行为,并预测和控制对应物理产品未来的状态和行为,即以虚控实。由于物理产品的状态、组成、行为、材料特性等都是动态变化的,为确保产品数字孪生体与产品实物在任何时刻的一致性,物理空间与虚拟空间必须深度融合,即彼此之间的数据和信息交互是双向通畅且实时的。一方面,物理产品行为和状态的改变能动态实时地在产品数字孪生体上展示出来;另一方面,产品数字孪生体能基于物理空间传递而来的环境感知数据、产品状态数据以及产品历史数据、经验与知识数据等进行智能分析与决策,并实时控制产品实物的状态和行为。

(2)闭环的产品全生命周期数字化管理 采用数字化手段实现闭环的PLM是实现智能制造的重要环节之一。产品数字孪生体从PLM演化而来,是产品全生命周期的数据中心和单一数据源,其目标之一是实现闭环的PLM,使得产品制造过程和产品使用过程可控、可视和可预测;允许将产品生产制造和运营维护的需求融入早期的产品设计过程中,形成设计改进的智能闭环。

(3)全价值链协同 工业4.0实施过程中的一个重要组成部分是价值链上下游企业间的数据集成以及价值链端到端的集成,本质是全价值链的协同。产品数字孪生体作为全价值链的数据中心,其目标是实现全价值链的协同。产品数字孪生体不仅要实现上下游企业间的数据集成和数据共享,也要实现上下游企业间的产品协同开发、协同制造和协同运维等。

## 6 产品数字孪生体在全生命周期各阶段的实施途径

### 6.1 产品设计阶段

作为物理产品在虚拟空间中的超写实动态模型,为了实现产品数字孪生体,首先要有一种自然(便于理解)、准确、高效,能够支持产品设计、工艺设计、加工、装配、使用和维修等产品全生命周期各个阶段的数据定义和传递的数字化表达方法。近年来兴起的MBD技术是解决这一难题的有效途径,因此成为实现产品数字孪生体的重要手段之一。MBD是指将产品的所有相关设计定义、工艺描述、属性和管理等信息都附着在产品三维模型中的数字化定义方法<sup>[24]</sup>。MBD技术使得产品的定义数据能

够驱动整个制造过程下游的各个环节,充分体现了产品的并行协同设计理念和单一数据源思想,这正是数字孪生体的本质之一。产品定义模型主要包括两类数据:①几何信息,即产品的设计模型;②非几何信息,存放于规范树中,与三维设计软件配套的PDM软件一起负责存储和管理该数据。

其次,在实现基于三维模型的产品定义后,需要基于该模型进行工艺设计、工装设计、生产制造过程,甚至产品功能测试与验证过程的仿真和优化。为了确保仿真及优化结果的准确性,至少需要保证以下三点:

(1)产品虚拟模型的高精确度/超写实性 产品的建模不仅需要关注几何特征信息(形状、尺寸和公差),还需要关注产品的物理特性(如应力分析模型、动力学模型、热力学模型以及材料的刚度、塑性、柔性、弹性、疲劳强度等)。通过使用人工智能、机器学习等方法,基于同类产品组的历史数据实现对现有模型的不断优化,使得产品虚拟模型更接近于现实世界物理产品的功能和特性。

(2)仿真的准确性和实时性 可以采用先进的仿真平台和仿真软件,例如仿真商业软件Ansys和Abaqus等。

(3)模型轻量化技术 模型轻量化技术是实现数字孪生体的关键技术之一。首先,模型轻量化技术大大降低了模型的存储大小,使得产品工艺设计和仿真所需要的几何信息、特征信息和属性信息可以直接从三维模型中提取,而不需要附带其他不必要的冗余信息<sup>[2]</sup>。其次,模型轻量化技术使得产品可视化仿真、复杂系统仿真、生产线仿真以及基于实时数据的产品仿真成为可能。最后,轻量化的模型降低了系统之间的信息传输时间、成本和速度,促进了价值链端到端的集成、供应链上下游企业间的信息共享、业务流程集成以及产品协同设计与开发。

### 6.2 产品制造阶段

产品数字孪生体的演化和完善是通过与产品实体的不断交互开展的。在生产制造阶段,物理现实世界将产品的生产实测数据(如检测数据、进度数据、物流数据)传递到虚拟世界中的虚拟产品并实时展示,实现基于产品模型的生产实测数据监控和生产过程监控(包括设计值与实测值的比对、实际使用物料特性与设计物料特性的比对、计划完成进度与实际完成进度的比等等)。另外,基于生产实测数据,通过物流和进度等智能化的预测与分析,实现质量、制造资源、生产进度的预测与分析;同时智能决

策模块根据预测与分析的结果制定出相应的解决方案并反馈给实体产品,从而实现对实体产品的动态控制与优化,达到虚实融合、以虚控实的目的。

因此,如何实现复杂动态的实体空间的多源异构数据实时准确采集、有效信息提取与可靠传输是实现数字孪生体的前提条件。近几年物联网、传感网、工业互联网、语义分析与识别等技术的快速发展

为此提供了一套切实可行的解决方案。另外,人工智能、机器学习、数据挖掘、高性能计算等技术的快速发展,为此提供了重要的技术支持。本文以装配过程为例建立了如图 7 所示的面向制造过程的数字孪生体实施框架。鉴于装配生产线是实现产品装配的载体,该架构同时考虑了产品数字孪生体和装配生产线数字孪生体。

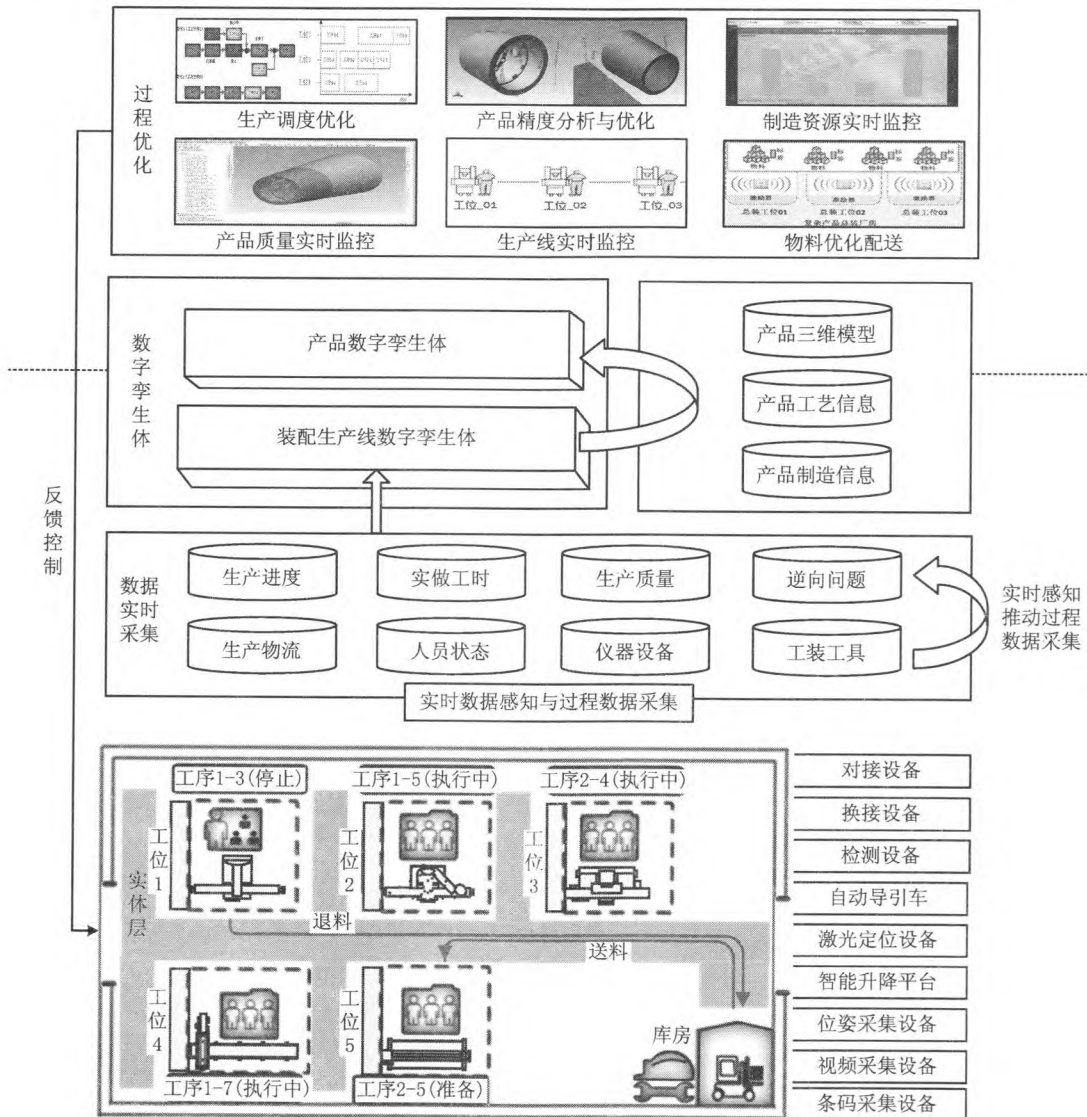


图7 面向产品制造过程的数字孪生体实施框架

该框架主要包括三个部分:

(1) 实体空间的动态数据实时采集 产品在装配过程中产生的动态数据可分为生产人员数据、仪器设备数据、工装工具数据、生产物流数据、生产进度数据、生产质量数据、实做工时数据、逆向问题数据八大类。首先,针对制造资源(生产人员、仪器设备、工装工具、物料、自动导引小车(Automatic

Guided Vehicle, AGV)、托盘),结合产品生产现场的特点与需求,利用条码技术、无线射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)、传感器等物联网技术进行制造资源信息标识,对制造过程感知的信息采集点进行设计,在生产车间构建一个制造物联网,实现对制造资源的实时感知。将生产人员数据、仪器设备数据、工装工具数据、生产物流数据等

制造资源相关数据归为实时感知数据;将生产进度数据、实做工时数据、生产质量数据和逆向问题数据归为过程数据。实时感知数据的采集将推动过程数据的产生。另外,针对以上数量庞大的多源、异构生产数据,在预定义制造信息处理与提取规则的基础上,对多源制造信息关系进行定义,并进行数据的识别和清洗,最后进行数据的标准化封装,形成统一的数据服务后对外发布。

(2)虚拟空间的数字孪生体演化 通过统一的数据服务驱动装配生产线三维虚拟模型以及产品三维模型,实现产品数字孪生体实例及装配生产线数字孪生体实例的生成和不断更新,将虚拟空间的装配生产线数字孪生体、产品数字孪生体实例与真实空间的装配生产线、实体产品进行关联,彼此通过统一的数据库实现数据交互。

(3)基于数字孪生体的状态监控和过程优化反馈控制 通过对装配生产线历史数据、产品历史数据的挖掘以及装配过程评价技术,实现对产品生产过程、装配生产线和装配工位的实时监控、修正及优化,通过实时数据和设计数据、计划数据的比对实现对产品技术状态和质量特性的比对、实时监控、质量预测与分析、提前预警、生产动态调度优化等,从而实现产品生产过程的闭环反馈控制以及虚实之间的双向连接。具体功能包括产品质量实时监控、产品质量分析与优化、生产线实时监控、制造资源实时监控、生产调度优化和物料优化配送等。

### 6.3 产品服务阶段

在产品服务(即产品使用和维护)阶段,仍然需要对产品的状态进行实时跟踪和监控,包括产品的物理空间位置、外部环境、质量状况、使用状况、技术和功能状态等,并根据产品实际状态、实时数据、使用和维护记录数据对产品的健康状况、寿命、功能和性能进行预测与分析,并对产品质量问题提前预警。同时,当产品出现故障和质量问题时,能够实现产品物理位置的快速定位、故障和质量问题记录及原因分析、零部件更换、产品维护、产品升级甚至报废、退役等。

一方面,在物理空间,采用物联网、传感技术、移动互联网技术将与物理产品相关的实测数据(最新的传感数据、位置数据、外部环境感知数据等)、产品使用数据和维护数据等关联映射至虚拟空间的产品数字孪生体。另一方面,在虚拟空间,采用模型可视化技术实现对物理产品使用过程的实时监控,并结合历史使用数据、历史维护数据、同类型产品相关历史

数据等,采用动态贝叶斯、机器学习等数据挖掘方法和优化算法,实现对产品模型、结构分析模型、热力学模型、产品故障和寿命预测与分析模型的持续优化,使产品数字孪生体和预测分析模型更加精确、仿真预测结果更加符合实际情况。对于已发生故障和质量问题的物理产品,采用追溯技术、仿真技术实现质量问题的快速定位、原因分析、解决方案生成及可行性验证等,最后将生成的最终结果反馈给物理空间、指导产品质量排故和追溯等。与产品制造过程类似,产品服务过程中数字孪生体的实施框架主要包括物理空间的数据采集、虚拟空间的数字孪生体演化以及基于数字孪生体的状态监控和优化控制。

## 7 产品数字孪生体的发展趋势

结合当前产品数字孪生体的发展现状,未来产品数字孪生体将向拟实化、全生命周期化和集成化3个方向发展。

### (1)拟实化——多物理建模

产品数字孪生体是物理产品在虚拟空间的真实反映,产品数字孪生体在工业领域应用的成功程度取决于产品数字孪生体的逼真程度,即拟实化程度。产品的每个物理特性都有其特定的模型,包括计算流体动力学模型、结构动力学模型、热力学模型、应力分析模型、疲劳损伤模型以及材料状态演化模型(如材料的刚度、强度、疲劳强度演化等)。如何将这些基于不同物理属性的模型关联在一起,是建立产品数字孪生体、继而充分发挥产品数字孪生体模拟、诊断、预测和控制作用的关键。基于多物理集成模型的仿真结果能够更加精确地反映和镜像物理产品在现实环境中的真实状态和行为,使得在虚拟环境中检测物理产品的功能和性能并最终替代物理样机成为可能,同时还能够解决基于传统方法(每个物理特性所对应的模型是单独分析的,没有耦合在一起)预测产品健康状况和剩余寿命所存在的时序和几何尺度等问题。目前,美国空军研究实验室正试图构建一个集成了不同物理属性的机体数字孪生体,从而实现对机体寿命的精准预测<sup>[8]</sup>。多物理建模将是提高产品数字孪生体拟实化程度、充分发挥数字孪生体作用的重要技术手段。

### (2)全生命周期化——从产品设计和服役阶段向产品制造阶段延伸

现阶段,有关产品数字孪生体的研究主要侧重于产品设计或售后服务阶段,较少涉及产品制造阶段,例如 NASA 和美国空军研究实验室通过构建产



品数字孪生体,在产品使用/服役过程中实现对潜在质量问题的准确预测,在产品出现质量问题时实现精准定位和快速追溯<sup>[7-9]</sup>。可以预见,产品数字孪生体在产品制造阶段的研究与应用将会是未来的一个热点。

例如,在产品制造阶段,将采集的制造过程数据与产品数字孪生体中对应的“单位模型”及“单位信息处理模型”相关联,实现虚拟产品与物理产品的关联映射,形成的 3D 模型不仅能在屏幕上显示,而且可以从多个维度与物理产品进行互动,如高亮需要注意的异常点、自动完成实测数据和设计数据的比对、自动验证/分析后续操作的可行性等。这种虚拟产品和物理产品之间的实时互动,将给产品的制造阶段带来效率的提高和质量的提升。以导引头光学系统的精度分析为例,在导引头光学系统的生产过程中,一方面,检测系统将采集到的检测数据实时传递给虚拟空间中的产品数字孪生体,基于产品数字孪生体实时展示实测数据及设计理论数据并进行直观比对。另一方面,基于实测数据计算和分析加工误差与装调误差,既可以通过调用产品数字孪生体内的工艺参数计算模块来确定工艺补偿量,并根据系统的稳定性和一致性要求对加工误差和装调误差进行实时补偿与控制,再根据工艺补偿确定整体系统补偿量,驱动执行机构发出指令,通过装配操作完成工艺补偿,也可以通过优化装配参数,基于现有实测数据,预测最终光学系统的光学性能和抗振动、温冲能力,并根据预测结果做出决策。

又如,基于物联网、工业互联网、移动互联等新一代信息与通信技术,实时采集和处理生产现场产生的过程数据(仪器设备运行数据、生产物流数据、生产进度数据、生产人员数据等),并将这些过程数据与产品数字孪生体和生产线数字孪生体进行关联映射和匹配,能够在线实现对产品制造过程的精细化管控(包括生产执行进度管控、产品技术状态管控、生产现场物流管控以及产品质量管控等);同时结合智能云平台以及动态贝叶斯、神经网络等数据挖掘和机器学习算法,实现对生产线、制造单元、生产进度、物流、质量的实时动态优化与调整。

### (3) 集成化——与其他技术融合

数字纽带技术作为产品数字孪生体的使能技术,用于实现产品数字孪生体全生命周期各阶段模型和关键数据的双向交互,是实现单一产品数据源和产品全生命周期各阶段高效协同的基础。美国国防部将数字纽带技术作为数字制造最重要的基础技

术,工业互联网联盟也将数字纽带作为其需要着重解决的关键性技术<sup>[18]</sup>。当前,产品设计、工艺设计、制造、检验、使用等各个环节之间仍然存在断点,并未完全实现数字量的连续流动;MBD 技术的出现虽然加强和规范了基于产品三维模型的制造信息描述,但仍主要停留在产品设计阶段和工艺设计阶段,需要向产品制造/装配、检验、使用等阶段延伸;而且现阶段的数字量流动是单向的,需要数字纽带技术实现双向流动<sup>[18]</sup>。因此,融合数字纽带和数字孪生体是未来的发展趋势。

另外,与增强现实(Augmented Reality, AR)技术的融合也是产品数字孪生体的发展方向之一。AR 技术是一种实时地计算摄影机影像的位置及角度并加上相应图像的技术,这种技术的目标是在屏幕上将虚拟世界套在现实世界并进行互动。将 AR 技术引入产品的设计过程和生产过程,在实际场景的基础上融合一个全三维的浸入式虚拟场景平台,通过虚拟外设,开发人员、生产人员在虚拟场景中所看到的和所感知到的均与实体的物质世界完全同步,因此可以通过操作虚拟模型来影响物质世界,实现产品的设计、产品工艺流程的制定、产品生产过程的控制等操作。AR 通过增强人们的见、声、闻、触和听,将打破人与虚拟世界的边界,加强人与虚拟世界的融合,进一步模糊真实世界与计算机所生成的虚拟世界的界限,使得人可以突破屏幕中的二维世界而直接通过虚拟世界来感知和影响实体世界。增强现实技术与产品数字孪生体的融合将是数字化设计与制造技术、建模与仿真技术、虚拟现实技术未来发展的重要方向之一,是更高层次的虚实融合。

## 8 结束语

数字孪生技术不仅利用人类已有的理论和知识建立虚拟模型,而且利用虚拟模型的仿真技术探讨和预测未知世界,发现和寻找更好的方法和途径、不断激发人类的创新思维、不断追求优化进步,因此数字孪生技术给当前制造业的创新和发展提供了新的理念和工具。

同时,数字孪生体的出现和发展为实现 CPS 提供了清晰的新思路、方法和实施途径,将对产品制造过程的智能化和产品本身的智能化有着巨大的推动作用。产品数字孪生体的建立,使得实体产品的加工/装配状态和运行状态能够实时、精确地反映在虚拟空间中,同时基于数字孪生体形成的优化决策信息,通过数字纽带技术传递到产品生产现场,实现了

信息的双向流动,使得利用信息的反馈机制对产品制造进行精确控制成为可能。

未来的产品开发能否实现更个性、更快速、更灵活、更智能的目标,关键在于真实世界和虚拟世界的融合度。产品数字孪生体通过集成设计/仿真、生产制造及使用,能够实现产品业务流程的全程可视化,规划细节,规避问题,闭环环路,优化整个系统。产品数字孪生体使得企业人员可以适应全新的工作方式、获得更高的灵活性,从而完成最艰巨的任务。最终,虚拟产品不但在形状、特征(尺寸、公差等)上与实体产品完全相同,而且在内容(产品组成和物理特性)和性质(功能特性)上也与实体产品完全相同。产品数字孪生体的实现,为虚拟空间和实体空间深度融合、平行发展和平行控制提供了实施途径。

目前产品数字孪生体的构建和应用还处于初级阶段,仍然有许多问题需要进一步研究。同时,目前数字孪生体主要应用于产品设计,在生产系统和车间方面的应用较少报导,因此,探讨生产车间的数字孪生体构建理论和方法,并通过构建整合制造流程的数字孪生车间,真正实现从产品设计、生产计划到制造执行全过程的数字化,会将产品创新、制造效率和有效性水平提升至一个新的高度。

## 参考文献:

- [1] ROSEN R, VON WICHERT G, LO G, et al. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing[J]. IFAC-Papers on Line, 2015, 48(3): 567-572.
- [2] GRIEVES M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication[EB/OL]. [2016-12-20]. [http://www.apriso.com/library/Whitepaper\\_Dr\\_Grievess\\_DigitalTwin\\_ManufacturingExcellence.php](http://www.apriso.com/library/Whitepaper_Dr_Grievess_DigitalTwin_ManufacturingExcellence.php). 2014.
- [3] GRIEVES M. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises[J]. International Journal of Product Development, 2005, 2(1/2): 71-84.
- [4] GRIEVES M. Product lifecycle management: driving the next generation of lean thinking[M]. New York, N. Y., USA: McGraw-Hill, 2006.
- [5] GRIEVES M. Virtually perfect: driving innovative and lean products through product lifecycle management[M]. Cocoa Beach, Fla., USA: Space Coast Press, 2011.
- [6] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]// Trans-disciplinary Perspectives on Complex Systems. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2017.
- [7] TUEGEL E J, INGRAFFEA A R, EASON T G, et al. Re-engineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2011. DOI:10.1155/2011/154798.
- [8] TUEGEL E J. The airframe digital twin: some challenges to realization[C]//Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Resron, Va., USA: AIAA, 2012: 1812.
- [9] GLAESSGEN E, STARGEL D. The digital twin paradigm for future NASA and US air force vehicles[C]//Proceedings of the 53rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Reston, Va., USA: AIAA, 2012: 1-14.
- [10] SHAFTO M, CONROY M, DOYLE R, et al. Modeling, simulation, information technology & processing roadmap[R]. Washington, D. C., USA: NASA, 2012.
- [11] Warwick, Graham. GE advances analytical maintenance with digital twins[N]. Aviation Week & Space Technology, 2015-10-19.
- [12] 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.]
- [13] National Standardization Technical Committee of Technical Product Documentation. GB/T26100-2010 General principle of digital mock-up for mechanical products[S]. Beijing: National Standardization Technical Committee of Technical Product Documentation, 2010(in Chinese). [全国技术产品文件标准化技术委员会. GB/T26100-2010 机械产品数字样机通用要求[S]. 北京: 全国技术产品文件标准化技术委员会, 2010.]
- [14] DING Deyu. A preliminary study of digital twin[EB/OL]. (2016-05-19). <http://www.wtoutiao.com/p/18aRVeR.html>(in Chinese). [丁德宇. 数字孪生体初探[EB/OL]. (2016-05-19). <http://www.wtoutiao.com/p/18aRVeR.html>.]
- [15] LIU Jianhua, SUN Liansheng, ZHANG Xu, et al. Connotation and key problem of three-dimensional digital design and manufacturing technology[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(3): 494-504(in Chinese). [刘检华, 孙连胜, 张旭, 等. 三维数字化设计制造技术内涵及关键问题[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(3): 494-504.]
- [16] BOSCHERT S, ROSEN R. Digital twin—the simulation aspect[M]//Mechatronic Future. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2016.
- [17] KRAFT E M. HPCMP CREATE™—AV and the air force digital thread[C]//Proceedings of the 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reston, Va., USA: AIAA, 2015: No. 0042.
- [18] Industry 4.0 terminology writing group. Digital thread[EB/OL]. (2016-03-31). [http://www.360doc.com/content/16/0331/22/22368478\\_546927596.shtml](http://www.360doc.com/content/16/0331/22/22368478_546927596.shtml) (in Chinese). [工业4.0术语编写组. Digital thread 数字主线[EB/OL]. (2016-03-31). [http://www.360doc.com/content/16/0331/22/22368478\\_546927596.shtml](http://www.360doc.com/content/16/0331/22/22368478_546927596.shtml).]
- [19] Industry 4.0 terminology writing group. Digital twin[EB/OL]. (2016-05-23). <http://www.hysim.cc/view.php?id=81>(in Chinese). [工业4.0术语编写组. Digital twin 数字孪生

- [EB/OL]. (2016-05-23). <http://www.hysim.cc/view.php?id=81>. ]
- [20] KINARD D. The digital thread-key to F-35 joint strike fighter affordability. [EB/OL]. (2010-09-01) [2016-12-20]. <http://www.onlineamd.com/amd-080910-f-35-joint-strike-fighter-digital-thread.aspx>.
- [21] SENDLER U, DENG Min. Industrie 4.0[M]. Beijing: China Machine Press, 2014: 11 (in Chinese). [森德勒, 邓敏. 工业 4.0——即将来袭的第四次工业革命[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 11.]
- [22] ZHOU Ji. Intelligent manufacturing—main direction of “Made in China 2025”[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273-2284 (in Chinese). [周济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.]
- [23] ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, TANG Chengtong, et al. Material dynamic tracking and management technology for discrete assembly process of complex product[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(1): 108-122 (in Chinese). [庄存波, 刘检华, 唐承统, 等. 航天产品离散装配过程中的物料动态跟踪与管理技术[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(1): 108-122.]
- [24] FAN Yuqing. Model based definition technology and its practices[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(6): 42-47 (in Chinese). [范玉青. 基于模型定义技术及其实施[J]. 航空制造技术, 2012(6): 42-47.]

### 作者简介:

- 庄存波(1991—), 男, 江西高安人, 博士研究生, 研究方向: 装配 MES 技术, E-mail: zcb9103@163.com;
- 刘检华(1977—), 男, 江西萍乡人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 数字化装配与检测技术;
- 熊辉(1974—), 男, 河南信阳人, 副教授, 研究方向: 装配 MES 技术, 通信作者, E-mail: xionghui@bit.edu.cn;
- 丁晓宇(1984—), 男, 河南项城人, 讲师, 研究方向: 数字化装配技术;
- 刘少丽(1984—), 女, 河北保定人, 讲师, 研究方向: 数字化检测技术;
- 瓮刚(1992—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 研究方向: 制造执行系统技术。