

# 数字孪生在制造业中的关键技术及应用研究综述

吴雁,王晓军,何勇,黄新伟,肖礼军,郭立新  
(上海应用技术大学机械工程学院,上海 201418)

**摘要:**数字孪生以数字化的形式在产品的生产制造中实现了全过程的动态仿真,覆盖了产品的全生命周期和全产业链,对推动未来智能制造的发展有着重要的意义。基于数字孪生技术在制造业中的应用,梳理了数字孪生的理念,探讨了数字孪生在制造业中的关键技术。对数字孪生在制造领域中的数据优化、质量分析、寿命预测、流程工业、离散工业和数字工厂几个方面的应用进行了综述,并对数字孪生在制造领域中的发展趋势提出预测及展望,可为推动数字孪生技术在未来制造业中的研究和应用提供一定的参考。

**关键词:**数字孪生;制造业;发展趋势;智能制造

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-3133(2021)09-0137-09

**DOI:**10.16731/j.cnki.1671-3133.2021.09.023

## Review on the technology and application of digital twin in manufacturing industry

WU Yan, WANG Xiaojun, HE Yong, HUANG Xinwei, XIAO Lijun, GUO Lixin

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

**Abstract:** Digital twin realizes the dynamic simulation of the whole process in the production and manufacturing of products in the form of digitalization, covering the whole life cycle of products and the whole industrial chain, which is of great significance to promote the development of intelligent manufacturing in the future. Based on the application of digital twin technology in manufacturing industry, the concept of digital twin was combed, the key technologies of digital twin in manufacturing industry were discussed. The application of digital twin in data optimization, quality analysis, life prediction, process industry, discrete industry and digital factory was reviewed. The development trend of digital twin in manufacturing field was forecasted and prospected, which can provide some reference for promoting the application of digital twin technology in the future manufacturing industry.

**Keywords:** digital twin; manufacturing industry; development trend; intelligent manufacturing

## 0 引言

自2004年至今,数字孪生技术从航空航天领域逐步发展到各个制造企业中,并在智能制造领域展现了良好的发展前景,逐步受到了来自军、民2个领域的重视,包括航空航天、汽车制造和机器人等行业均开始关注和探索数字孪生的关键技术和应用潜力。

数字孪生是企业迈向智能制造战略目标的关键技术。随着制造业不断走向智能化,该技术逐渐应用在制造业中,成为连接传统制造和智能制造的关键纽带。如:世界上最大的武器生产商洛克希德马丁已经将数字孪生技术列为未来国防和航天工业六大顶尖技术之首<sup>[1]</sup>。Gartner公司连续3年(2017~2019年)将数字孪生作为十大战略科技发展趋势之一<sup>[2-3]</sup>。西门子公司提出了数字化双胞胎<sup>[4]</sup>的概念,用来帮助

制造企业在信息和数字空间中构建整个制造流程的生产系统模型,实现物理空间中从产品设计到产品制造的全设计周期的数字化。GE公司基于Predix平台构建出资金流的数字孪生系统,生产商和运营商可以分别依据此系统实现产品全生命周期的预测<sup>[5]</sup>。2017年11月在世界智能制造大会中,中国科协智能制造学会联合体正式将数字孪生列为世界智能制造十大科技进展之一<sup>[6]</sup>。

数字孪生在制造领域具有极大的应用潜力:在产品的设计及研发方面,通过建立产品数字孪生模型,可以在各部件未被加工出来之前,对其进行虚拟加工与验证,避免反复迭代所带来的高昂成本和漫长周期<sup>[7]</sup>。西门子公司提出了基于Teamcenter+NX集成一体化平台的解决方案<sup>[8]</sup>,通过将基于知识工程的产品快速设计、基于Check-Mate的一致性质量检查和

NX PMI 完整三维注释环境等一系列功能进行融合,形成一个高效的三维虚拟模型设计环境,帮助用户对三维产品进行快速建模。在产品的制造方面,通过产品的生产环境进行数字孪生体的构造,可模拟产品在加工过程中的实时状态,并通过合理分配资源来减少生产时间,从而提高生产效率。Bentley 软件公司推出一款数字化解决方案 Plant Sight,它能提供工厂的数字孪生模型,能够实现物理现实与工程数据值之间的同步,为实现所有运营工厂中不同数据源之间的一致性打造全面的数字化环境<sup>[6]</sup>。在产品运行周期管理方面,利用产品数字孪生模型,可检测产品损伤状态,并通过数据进行实时反馈,以提高寿命预测能力,进而指导实际生产。PTC 公司致力于在虚拟世界和现实世界之间建立一个实时的连接,将智能产品的每一

个动作延伸到下一个产品的设计周期,从而实现产品的预测性维修,给予客户高效的产品售后服务<sup>[9]</sup>。

数字孪生在各个领域的快速发展彰显了其巨大的价值<sup>[7]</sup>。本文聚焦于基于数字孪生的制造,从数字孪生概念出发,分析数字孪生的关键技术,并对其在制造领域的应用进行综述,最后总结出数字孪生技术在制造业中的研究方向与应用趋势。

## 1 数字孪生的理念

### 1.1 定义与内涵

数字孪生涉及的学科范围较广,自概念提出以来,至今没有一个全面且具体的定义去涵盖各个方面。国内外学者从自己的研究角度出发,对其进行了定义,不同领域对数字孪生的定义如表 1 所示。

表 1 不同领域对数字孪生的定义

机构/作者	时间	定义
NASA <sup>[8]</sup>	2011	一种面向飞行器或系统的高集成多物理场、多尺度、多概率的仿真模型,能够利用物理模型、传感器数据和历史数据等反映该模型对实体的功能、实时状态和演变趋势。
GLAESSGEN 等人 <sup>[9]</sup>	2012	数字孪生是一个综合多物理、多尺度、多概率模拟的复杂系统,使用最佳的物理模型、传感器更新和飞行器历史等镜像其飞行器数字孪生的生命。
西门子 <sup>[4]</sup>	2015	数字孪生是以数字化方式为物理对象创建虚拟模型,模拟其在现实中的行为特征,应用于整个产品生命周期的数据、模型及分析工具的集成系统。
GRIEVES 等人 <sup>[10]</sup>	2017	数字孪生是从微观原子级到宏观几何全面描述潜在生产或实际制造产品的虚拟信息结构。
庄存波等人 <sup>[11]</sup>	2017	产品数字孪生是指物理实体的工作状态和工作进展在信息空间的全要素重建及数字化映射,是一个集成多物理、多尺度、超写真、动态概率的仿真模型。
陶飞等人 <sup>[12]</sup>	2018	数字孪生是以数字化方式建立物理实体多维、多空间尺度、多学科、多物理量的动态虚拟模型,仿真和刻画物理实体在真实环境中的属性、行为、规则等的技术。
HAAG 等人 <sup>[13]</sup>	2018	数字孪生是单个产品的全面数字化表示,是通过模型和数据(包括实际生命对象的属性、条件以及行为),模拟它在现实环境中实际行为的模型。
崔一辉等人 <sup>[14]</sup>	2019	数字孪生是充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟空间完成映射,从而反映相对应的实体装备全生命周期过程的技术。
李浩等人 <sup>[15]</sup>	2020	数字孪生是通过虚实交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段,为物理实体增加或扩展新的能力的技术。

通过对上述定义分析可知,数字孪生主要是由物理空间的物理实体和虚拟空间的虚拟实体组成,通过虚实之间的数据进行动态连接。从制造业方面来讲,人们可以通过生产设备的虚拟实体清楚地观测所制造的产品在当前阶段所处的状态,并通过虚拟实体对物理实体进行实时智能控制,进一步实现物理实体和虚拟实体之间的控制与反馈。

### 1.2 数字孪生与信息物理系统及物联网技术

数字孪生与信息物理系统(Cyber-Physical System, CPS)及物联网(Internet of Things, IoT)技术之间的关系<sup>[16]</sup>如图 1 所示。

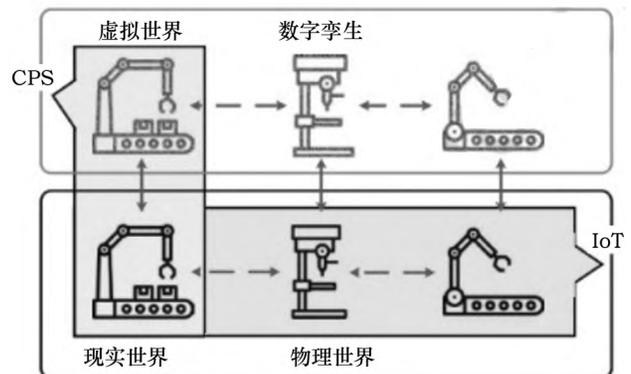


图 1 数字孪生与 CPS 及 IoT 之间的关系

其中 CPS 的内涵是虚实双向动态连接,而数字孪生是通过物理实体镜像出一个信息化的数字孪生体,因此数字孪生是 CPS 技术实现的基础<sup>[5]</sup>。而 IoT 是通过网络数据实现工业物理实体之间的信息追踪,不会涉及具体实体的虚拟仿真。苏新瑞等人<sup>[17]</sup>提出了应用于生产全流程的数字孪生的创建图,清楚地展示了 IoT、CPS 和数字孪生三者之间的关系。GUO 等人<sup>[18]</sup>提出了一种基于 CPS 架构的数据原型采集系统,通过在数据采集的过程中增加对设备误差的评估,提升了设备数据采集的容错率和准确率。

### 1.3 理念研究进展

越来越多的研究人员对数字孪生的定义及其涉及的领域进行了更深入的探究。其中:ROSEN 等人<sup>[19]</sup>在“工业 4.0”的基础上,讨论了数字孪生虚拟仿真的方法,并基于该方法深入讨论了数字孪生自主学习的概念及运用,表明数字孪生是一种自适应外部环境的仿真系统。NEGRI 等人<sup>[20]</sup>进行了数字孪生的概念分析,通过综述数字孪生在不同时间段的不同内涵,及其在各自的研究领域中所涉及的关键技术和研究方法,提出了未来“工业 4.0”中基于 CPS 的数字孪生,为未来的发展提供了研究方向。陶飞等人<sup>[21]</sup>分析了数字孪生在企业上的应用和理论研究上的进展,在五维模型的基础上,提出了数字孪生应用的 6 条基本应用准则,探索了该技术未来 14 个应用设想及可能用到的关键技术,为未来数字孪生的应用提供了理论和方法的指导。李浩等人<sup>[22]</sup>依据制造一体化技术开发内涵,提出了基于数字孪生的复杂产品环形设计框架,从需求分析、概念设计和虚拟样机等多个方面,探索了数字孪生在复杂产品设计制造一体化研究中的关键技术,并通过具体案例说明了该技术的应用场景。北航团队<sup>[12]</sup>在原有数字孪生三维模型基础上,提出了数字孪生的五维模型,如图 2 所示。

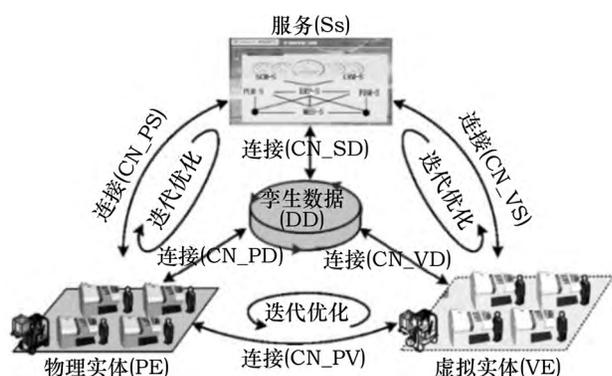


图 2 数字孪生的五维模型

数字孪生的 5 个维度分别指的是物理实体 (PE)、虚拟实体 (VE)、服务 (Ss)、孪生数据 (DD) 以及连接 (CN),各部分之间可以进行有效的连接,以保证系统在运行过程中的合理性和稳定性。

## 2 数字孪生在制造业中的关键技术

数字孪生的核心是通过虚拟场景实时地反映和预测物理场景,从而优化和改善现实中的生产制造,其关键技术主要包括以下几个方面。

### 2.1 多维度建模与仿真技术

相比传统计算机辅助设计/计算机辅助制造 (Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing, CAD/CAM) 技术,多维度建模需要融合环境、材料性能等诸多因素,以及力、热、电等许多属性,使其能在最大程度上模拟现实状态。LEU 等人<sup>[23]</sup>从 3D 物体表面获取数据,构建 CAD 模型,并与增强现实 (Augmented Reality, AR) 技术相结合,提供运动捕捉、力学建模和多动态渲染等操作,集成了装配系统的设计、规划、评估和测试功能。LIU 等人<sup>[24]</sup>开发了一种通用最佳拟合和形状自适应算法,分析了刚体拟合特征的基本原理,以消除虚拟零件自动对齐和拟合缺陷带来的干扰。

### 2.2 虚拟现实技术

虚拟现实技术通过提高用户的感知能力来获取更好的沉浸感,以实现真实世界与虚拟世界的互动,更加真实地模拟出实际效果。HU 等人<sup>[25]</sup>提出了离线数据和在线数据耦合作业的表征方法,实现了集成数据可视化的复杂装备作业流程及装配建模仿真。通过构建数字孪生,可充分展现复杂装备在关键流程时序下多种数据同时变化的规律。LI 等人<sup>[26]</sup>利用动态贝叶斯网络进行多功能诊断和预测,从而实现了数字孪生视觉,并通过所获得数据的实时反馈与处理对贝叶斯模型进行更新,显著降低了时间成本。

### 2.3 数据分析处理技术

利用大数据等各种数据处理技术,可将数据进行实时存储、筛选、处理和交互等,从而对外部环境的变化进行有效的判断和处理。SODERBERG 等人<sup>[27]</sup>总结了构建保证制造过程中几何精度的数字孪生模型所需的实时数据提取、性能仿真优化技术等。CANADAY 等人<sup>[28]</sup>提出数字孪生模型可融合来自 ADS-B 系统的飞机位置信息、天气数据和飞机上各个传感器数据,以及来自维修车间和制造商的维修数据,从而指导技术人员对设备进行故障预测和维修。

## 2.4 平台构建处理技术

在统一平台中有机地融合多物理场仿真、数据管理、大数据分析和动态数据驱动决策等多个模块<sup>[7]</sup>,并通过可视化的形式呈现出来,可使决策者进行统一处理。西门子公司在整个企业及上下游的供应商之间建立了一个集成和协作的环境方法,各业务环节均在全三维产品定义的基础上展开工作,有效地缩短了研制周期,改善了工作环境,提高了质量和生产效率<sup>[29]</sup>。达索公司依据数字孪生技术建立了3D EXPERIENCE 体验平台,该平台利用知识和专业技术将所有技术和功能集成到一个统一的数字化创新环境中,实现了从概念、生产直至交付使用、废弃回收的产品全生命周期的数字连续性<sup>[30]</sup>。

综上所述,数字孪生是一种融合CAD、AR及大数据技术等多学科技术的系统工程,用于实现物理世界和虚拟世界的信息交互。数字孪生必然成为智能制造的重要发展趋势。然而数字孪生仍处于研究阶段,许多技术仍然不成熟,且并没有完全实现技术有效融合;因此,研究多学科技术之间的融合,有助于打破信息传递之间的壁垒,对于未来数字孪生以及智能制造的发展都有着重要意义。

## 3 数字孪生在制造业中的应用

2015年,RIOS教授和其团队共同提出在制造领域中构建数字孪生体,打破了以往数字孪生仅在航空航天领域中应用的局限<sup>[31]</sup>。LEE和其团队提出了构建整个生产资源的数字孪生,认为数字孪生体不应局限于产品,而应当应用到整个先进的制造业当中,例如将数字孪生作为“工业4.0”的核心,将大数据分析和云平台应用到数字孪生体中等<sup>[32]</sup>。自此以后,将数字孪生应用到制造业的研究一直持续到现在,受到了国内外广泛的关注。

### 3.1 数据优化

SODERBERG等人<sup>[27]</sup>利用数字孪生对产品生产的几何运动进行了研究,设计了一种用于保证产品尺寸的数字孪生系统,通过数字孪生体对产品坐标及加工轨迹的仿真,进行误差分析和轨迹优化,从而优化了产品的定位及加工轨迹,确保了产品的加工质量。林润泽等人<sup>[33]</sup>开发了一种基于数字孪生的机械臂实验系统。该系统利用Simulink仿真环境,将机械臂模型与实体联系起来。通过输入实际采集得到的运动数据,驱动DT模型的运动,并在可视化的环境中显示运动仿真结果,实际运行效果与机械臂运动轨迹一一

对应。同时,通过机械臂末端执行器生成的线速度曲线判断轨迹规划结果的优劣。通过对运动轨迹进行样条插值求解,优化机械臂末端执行器的速度曲线,以减少潜在的机械磨损。梁生龙<sup>[34]</sup>利用数字孪生中的信息承载功能,对燃气轮机的生产参数进行了校正。首先利用数字孪生设计出推理模型,并将选取的生产参数输入该模型内。其次,通过7个数据集定义输入和输出变量。最后,构建统计模型规则库,归纳出生产参数的基本调整规律。研究表明推理模型可以使校正值与误差形成相反的结果,运用数字孪生得到的参数校正比例相比其他研究方法得到的结果更加符合理想状态,不同研究方法参数校正比例<sup>[34]</sup>如图3所示,表明基于数字孪生的燃气轮机生产参数校正方法应用效果更好。

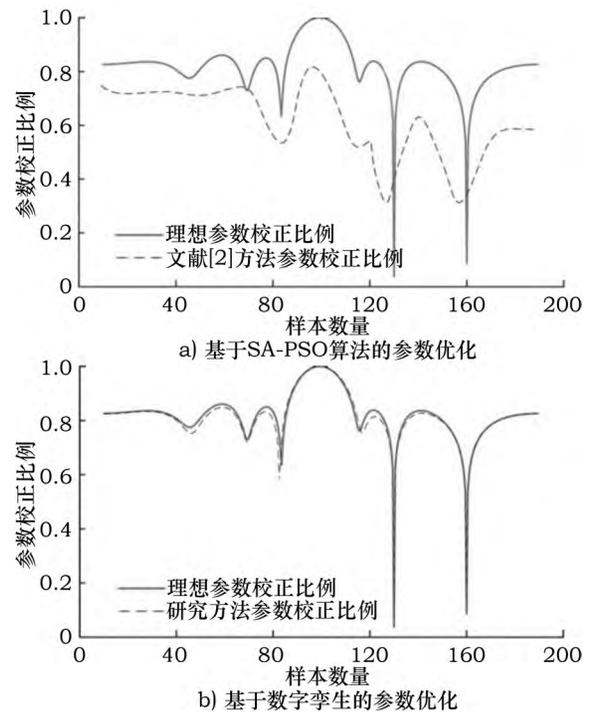


图3 不同研究方法参数校正比例

### 3.2 质量分析

孙惠斌等人<sup>[35]</sup>提出了刀具的数字孪生模型,详细论述了数字孪生驱动的刀具磨损检测、剩余寿命预测、刀具选用决策和刀具服务,并通过刀具原型进行了验证。在概率框架下求解剩余寿命及置信区间,量化并减小预测结果的不确定性,为刀具选用和更换的决策和优化提供了可靠依据。GOHARI等人<sup>[36]</sup>基于虚拟模型提出了IIS检查系统。通过大数据建立产品孪生模型,同时使用IIS表面质量检查系统检查产品质量,从而确定产品的表面质量是否满足要求,避免

了对实际产品的损伤,并通过实验检验了该方法的有效性。DEBROY 等人<sup>[37]</sup>研究了3D打印材料的数字孪生体。该数字孪生体可以和实际材料一样进行热流模拟、凝固模拟、晶粒结构与组织演化及参与应力的模拟。其中数字孪生材料的热力学性能模拟如图4所示。图4b)中,L1、L3、L5、L7、L9分别对应材料不同冷却层级;图4d)中,G为温度梯度,R为凝固生成速率。通过实验模拟分析可得,数字孪生体能够准确地对实际材料性能进行仿真。该研究成果不仅可以应用到3D打印的研究中,而且可以应用到其他产品中。

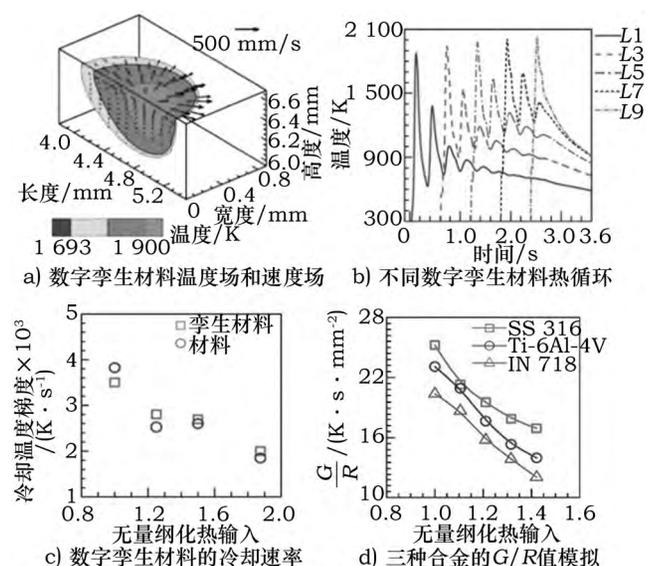


图4 数字孪生材料的热力学性能模拟

### 3.3 寿命预测

丁华等人<sup>[38]</sup>提出了数字孪生与深度学习融合驱动的采煤机健康状态预测方法,并建立了关键零/部件寿命预测模型,实现了实时监测状态下采煤机零/部件寿命预测。KRAFT 等人<sup>[39]</sup>提出了发动机数字孪生模型,用于检测发动机退化和失效,以及预测关键零/部件寿命消耗,并在实际应用中得到了有效验证。苗田等人<sup>[16]</sup>给出了数字孪生在产品全生命周期的内涵,总结了数字孪生体的全生命周期,并对未来的制造模式指出了方向。宋悦等人<sup>[40]</sup>以光电探测系统能量域表述为基础,建立了数字孪生模型,以解决性能退化寿命预测问题。赵亮等人<sup>[41]</sup>指出了我国航空产品数字孪生寿命预测的思路和需要解决的关键技术,以推动航空产品研制传统模式向预测型模式的转变。

### 3.4 流程工业

流程工业主要是指钢铁、冶金、化学及有色金属等传统原材料制造行业,是国民经济发展的命脉<sup>[42]</sup>。

由于流程工业原材料变化频繁,生产过程连续且任一工序出现问题必然会影响到整个生产线的运行<sup>[43]</sup>,因此流程工业的数字化发展是未来发展的主要方向。ZHOU 等人<sup>[44]</sup>提出了应用数字孪生、物联网等数字化建设实现现代化的流程工业,通过全面分析各个专业之间的相互联系,提出了JPS流程知识图,用于指导数字化电厂的建设。KOCKMANN<sup>[45]</sup>通过对德国ProcessNet公司所发表的关于流程工业数字化的论文进行分析,认为模块化的设备、流程或整个流程工业的数字孪生可以简化生产工作流程,解决数据分析、网络系统和人工智能等相关技术的问题。BEVILACQUA 等人<sup>[46]</sup>提出了流程工业数字孪生模型,如图5所示。其意义在于,通过严格的技术和组织方面的干预,有可能发现、识别问题并制定纠正措施,从而保证运营商的安全,降低维护和运营成本,以更全面地改善公司业务。李彦瑞等人<sup>[47]</sup>描述了流程工业抽象模型与数字孪生理论模型之间的映射关系,分析了将数字孪生应用到流程工业中所需要解决的关键技术,并在实际工业中进行了应用,表明了该技术的可行性。

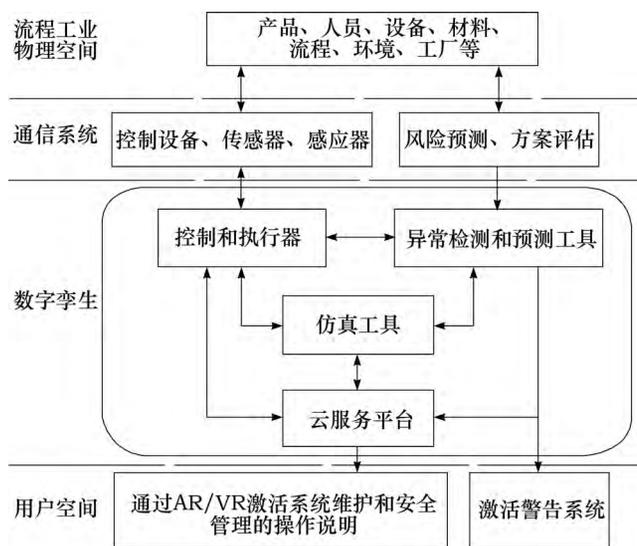


图5 流程工业数字孪生模型

### 3.5 离散工业

离散工业主要是指机电产品制造行业,诸如飞机、汽车、船舶、机床及武器的制造等都属于离散工业。现阶段离散工业产品生产是由许多制造商共同完成的,因此在实际生产中不可避免地会出现装配误差等诸多问题。CAI 等人<sup>[48]</sup>构建了一种数控机床的数字孪生模型,将制造数据和感官数据集成到数字孪生模型中,以提高物理机床的可靠性和加工能力。CHEN<sup>[49]</sup>以离散制造业车间为研究对象,应用工作流

程系统的理论模型和数字孪生,设计了车间总体结构,给出了面向车间的工业物联网解决方案。唐竞<sup>[50]</sup>提出了在航空机电产品装配中应用数字孪生技术,通过实时数据辅助工艺决策,从而实现快速工艺装配效果。周倩<sup>[51]</sup>提出了离散工业数字化转型“三步走”策略,应用数字孪生策略突破了离散工业数字化瓶颈。

### 3.6 数字工厂

西门子公司设计了数字孪生驱动的多学科协同开发平台。该平台以机电概念设计平台为核心,融合了机械技术、电气技术、自动化技术和信息处理等多种学科,并通过 Teamcenter 管理平台实现了多个学科之间的信息交互;通过对集成电气和自动化元件的设备模型进行仿真,快速验证设计结果并进行及时反馈,可持续改进和优化设计阶段的数字孪生模型<sup>[32]</sup>。昆山沪光汽车打造了集仓库管理、数据采集、监视监控、生产执行与工程设计于一体的智能生产制造平台。通过采用数字化线束工艺设计方法,规范化线束工艺设计流程,构建工艺设计知识库,标准化工艺研发输出,从而缩短了工艺研发周期,提升了输出质量,可自动输出对接其他系统物料信息及工艺数据<sup>[4]</sup>。PTC 公司和 ANSYS 公司共同构建了水泵数字孪生体,如图 6 所示,通过传感器采集设备数据,并反馈至计算系统,通过 ThingWorx 平台对数据进行分析处理,并反馈到数字孪生模型中<sup>[52]</sup>。该数字孪生体能够自动模拟水泵的正常运行状态,鉴别异常运行状态,并预测产品各部件的寿命及可能出现的结果。

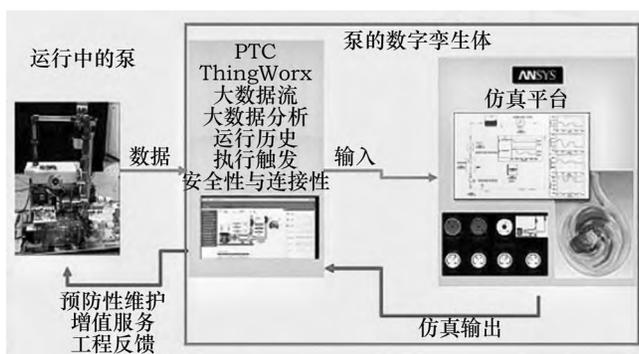


图 6 水泵数字孪生体

综上所述,数字孪生能够实现虚拟与现实的双向耦合,提高产品剩余寿命和预测精度。通过实时监测数据来动态更新模型,可进一步提高分析的可靠性。相关学者不仅在理论方面进行了材料、制造过程优化、参数校正及寿命预测分析等方面的研究,还将研究应用到实际当中,构建了例如数字化流程工业、数

字化工厂等制造过程中的数字孪生体,使其能够更好地服务于生产。但是,数字孪生仍是一个新兴的技术,在很多方面还处于探索阶段;因此,本文提出了数字孪生在未来研究过程中的理论和应用的发展趋势,以为未来的研究提供一定的参考。

## 4 数字孪生的发展趋势

### 4.1 理论研究趋势

1)数字孪生需要制定一个统一的标准。要将数字孪生推向世界,应当使其合理化、规范化,具有普遍适用性。北航团队提出了数字孪生标准体系架构,为数字孪生标准的制定与研究提供了指导<sup>[53]</sup>。赵亮等人<sup>[41]</sup>提出了智能制造理论体系架构,明确了数字孪生在该领域中所处的地位及发挥的作用。但是由于对标准方面讨论的文献较少,且存在着标准不一定全面、考虑行业还不够广泛等缺点,因此制定数字孪生的技术标准,是推进数字孪生国际化急需解决的一个问题。

2)数字孪生系统的智能化发展。数字孪生模型必须具有自我学习的能力,通过数据分析实现自我修正和调节,从而更加快速且准确地进行生产和制造。例如,PTC 公司设计了一个 ThingWorx 智能数字孪生平台,能自动学习设备运行时的状态,自主生成预测结果<sup>[54]</sup>。所以,数字孪生系统应当智能化,以实现数据的分析和预测,决策出最优的系统反馈。

3)数字孪生的信息化、网络化发展。数字孪生需要将物理实体的每一个细节和动作精确地反映出来。为了达到这种效果,核心要义就是实现信息之间的快速传递。而随着网络技术的不断发展,数字孪生体之间的信息交互必须要与网络紧密结合在一起。实现基于数字孪生的数据网络融合也是一个重要的研究趋势。王飞跃<sup>[55]</sup>将经典控制理论应用到数字孪生的技术中,提出了平行控制数学形式,通过分析表明该理论非常适合云边计算范式,值得深入探索和研究。

4)数字孪生系统安全性。数字企业的核心要素之一就是工业信息安全。随着数字孪生与智能制造的加速融合,由封闭系统向开放系统的转变势在必行,系统性的网络安全风险将集中呈现<sup>[30]</sup>。一方面,智能制造控制系统面临着未知的风险;另一方面,数字孪生数据也面临着数据的安全风险。典型的案例包括:2011 年伊朗核设施遭受到电脑病毒“震网”选择性攻击;2012 年 Saudi Aramco 石油和天然气公司的 3 万台电脑被一种名为 Shamoon 的恶意软件感染和损

坏<sup>[5]</sup>。可见,数据孪生系统从设计之初就必须考虑系统的安全性,避免在使用过程中出现信息泄露的风险。针对上述情况,李欣等人<sup>[56]</sup>分析了数字孪生应用所面临的主要网络安全风险和挑战,给出了该技术网络安全保障方案,为提高数字孪生应用的安全性提供了参考。唐文虎等人<sup>[57]</sup>提出了数字孪生的安全防护机制,针对网络面临的恶意解析和篡改等进行分析,研究了网络攻击检测和防御技术,并论述了所需要注意的关键点。

#### 4.2 应用发展趋势

1) 在产品阶段,实现产品状态与数字孪生模型信息同步,实现数据之间的一一映射,并在设计阶段及时发现产品缺陷。数字孪生的核心之一就是虚拟和现实的高度统一,因此在设计时更趋向于多领域、多尺度的融合建模。该模型应可以连接不同尺度之间的物理过程,用以模拟众多的科学问题<sup>[58]</sup>,相比现阶段的数字模型,更加具有可实现性和预测性,有助于建立更加精确的数字孪生系统。例如:印度科技学院建立了超临界二氧化碳循环的数字孪生体,以模拟各个控制操作所引发的后果,确认无误后再进行实际操作,从而保证系统运行安全<sup>[52]</sup>。路清等人<sup>[59]</sup>通过对飞机架构模型设计、多模型架构集成以及模型参数辨识和验证几个方面的研究,对数字孪生在飞机设计验证过程中的应用进行了探讨。于勇等人<sup>[60]</sup>提出了数字孪生环境下的计算机辅助工艺过程设计(Computer Aided Process Planning, CAPP),探讨了基于实作模型的实时工艺决策和基于数字孪生的工艺知识挖掘技术。

2) 在产品制造阶段,构建全生产线的数字孪生模型,实现加工全过程的实时监控与远程控制。未来的制造,一定是具有高度集成化和智能化的生产体系,数字孪生可以很好地实现生产线的数字化仿真,将车间的生产状态通过数字孪生体实时反映在监控端,并通过数据分析对生产状况进行分析和处理。西门子利用数字孪生构建了“安倍格”数字化工厂,最大程度实现了生产自动化、个性化和自我优化,继而提高了生产资源效率,降低了生产成本<sup>[52]</sup>。肖莹莹等人<sup>[61]</sup>提出了一种基于数字孪生的智能制造管理计划系统框架,提升了多品种、小批量制造模式在制造过程中应对一系列不确定因素的效率。樊留群等人<sup>[62]</sup>探讨了数字孪生在产品制造中所处的地位,并展望了该技术在未来制造业中的发展。

3) 在产品维护阶段,利用数字孪生实现产品的售

后及设备的维护。现在的产品都具有高精度、高复杂性和高集成性等特点,在使用时极易出现损坏且不易维修。通过数字孪生模型,可以预测产品在使用过程中可能出现的问题,使之能够及时进行改进,避免在使用过程中造成不必要的损失。陶飞等人<sup>[63]</sup>探索了面向服务的智能制造,并制定了具体框架,指出数字孪生是未来数据融合的关键基石。任涛等人<sup>[64]</sup>基于数字孪生思想模型,提出了描述光电探测系统性能退化的模型体系,通过验证有效地证明了系统仿真的有效性。

4) 在应用阶段,由于数字孪生的复杂性和高成本性,目前该技术在制造领域中主要应用于航空航天、汽车制造、流程工业及智能工厂等一些高精尖的制造领域。其中,陶飞等人<sup>[12]</sup>和崔一辉等人<sup>[14]</sup>结合数字孪生的五维模型,探索了现阶段及未来数字孪生的应用领域以及需要突破的关键技术,为相关领域应用数字孪生提供了一定的参考。赵浩然等人<sup>[65]</sup>提出了数字孪生车间的三维可视化监控方法,解决了车间实时可视化监控的难题。但是由于该项技术的成本及其他原因,使得现阶段很多企业并未普及该项技术;因此,使制造企业逐步应用数字孪生也是未来的重要发展方向。

## 5 总结和展望

本文结合国内外研究发展现状,归纳了数字孪生的定义及理念研究进展,分析了数字孪生在制造业中的关键技术,综述了数字孪生在制造业中数据优化、质量分析、寿命预测、流程工业、离散工业及数字工厂等方面的国内外研究现状,并在此基础上对数字孪生在理论和实践方面的发展趋势和挑战进行了总结和探讨,为将来数字孪生的进一步应用提供了理论和方法参考。可以预见,在工业大环境的推动和发展作用下,数字孪生将是推动智能化制造发展的关键技术。数字孪生与产品全生命周期的结合成为制造业发展的必然趋势,在未来智能制造方面有着极大应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 李凯,钱浩,龚梦瑶.基于数字孪生技术的数字化舰船及其应用探索[J].科技论坛,2018,29(6):101-108.
- [2] CEARLEY D W, BURKE B, SEARLE S, et al. Top 10 strategic technology trends for 2018 [EB/OL]. (2017-10-03) [2020-03-08]. <http://brilliantdude.com/solves/content/GartnerTrends2018.pdf>.
- [3] BEATE B, VERA H. Digital twin as enabler for an innovative digital shopfloor management system in the ESB logistics

- learning factory at Reutlingen-University[J]. *Procedia Manufacturing*, 2017(9):198-205.
- [4] 梁乃明,方志刚,李荣跃,等.数字孪生实践[M].北京:机械工业出版社,2020.
- [5] 郭亮,张煜.数字孪生在制造中的应用进展综述[J]. *机械科学与技术*, 2020,39(4):590-598.
- [6] 蔡远利,高鑫,张渊.数字孪生技术的概念、方法及应用[C]//第二届中国系统仿真技术及其应用学术年会论文集.[出版地不详]:[出版者不详],2019.
- [7] 孟松鹤,叶雨玫,杨强,等.数字孪生及其在航空航天中的应用[J]. *航空学报*, 2020,41(9):6-17.
- [8] 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, 2011:1-14.
- [9] GLAESSGEN E, STARGEL D, GLAESSGEN E, et al. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles [C]//Aiaa/asme/asce/ahs/asc Structures, Structural Dynamics & Materials Conference Aiaa/asme/ahs Adaptive Structures Conference Aiaa. [S.l.]:[s.n.],2012.
- [10] GRIEVES M, VICKERS J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems[M]//*Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. [S.l.]:Springer International Publishing, 2017.
- [11] 庄存波,刘检华,熊辉,等.产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J]. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(4):753-768.
- [12] 陶飞,刘蔚然,张萌,等.数字孪生五维模型及十大应用领域[J]. *计算机集成制造系统*, 2019,25(1):1-25.
- [13] HAAG S, ANDERL R. Digital twin-proof of concept[J]. *Manufacturing Letters*, 2018,15:64-66.
- [14] 崔一辉,杨滨涛,方义,等.数字孪生技术在航空发动机智能生产线中的应用[J]. *航空发动机*, 2019,45(5):93-96.
- [15] 李浩,王昊琪,程颖,等.数据驱动的复杂产品智能服务技术与应用[J]. *中国机械工程*, 2020,31(7):757-772.
- [16] 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.
- [17] 苏新瑞,徐晓飞,卫轶嘉,等.数字孪生关键技术应用及方法研究[J]. *中国仪器仪表*, 2019(7):47-53.
- [18] GUO A, YU D, HU Y, et al. Design and implementation of data collection system based on CPS model[C]//*Proceedings of the 2015 International Conference on Computer Science and Mechanical Automation (CSMA)*. Hangzhou: IEEE, 2015.
- [19] ROSEN R, VON W G, LO G, et al. About the Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2015,48(3):567-572.
- [20] NEGRI E, FUMAGALLI L, MACCHI M. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems [J]. *Procedia Manufacturing*, 2017(11):939-948.
- [21] 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.
- [22] 李浩,陶飞,王昊琪,等.基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发框架与关键技术[J]. *计算机集成制造系统*, 2019,25(6):1320-1336.
- [23] LEU M C, ELMARAGHY H A, NEE A Y C, et al. CAD model based virtual assembly simulation, planning and training[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2013, 62(2):799-822.
- [24] LIU R, WANG Z, LIOU F. Multifeature-Fitting and Shape-Adaption Algorithm for Component Repair[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2017,140(2):021003.
- [25] HU L, LIU Z, TAN J. A VR simulation framework integrated with multisource CAE analysis data for mechanical equipment working process [J]. *Computers in Industry*, 2018(97):85-96.
- [26] 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.
- [27] SODERBERG R, WARMEFJORD K, CARLSON J S, et al. Toward a digital twin for real-time geometry assurance in individual production [J]. *CIRP Annals*, 2017, 66(1):137-140.
- [28] CANADAY H, 李韵.数字孪生技术的关键在于数据[J]. *航空维修与工程*, 2019(10):15-16.
- [29] 陈睿.国外数字孪生进展与实践[J]. *上海信息化*, 2019(1):80-82.
- [30] 戴晟,赵罡,于勇,等.数字化产品定义发展趋势:从样机到孪生[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2018, 30(8):1554-1562.
- [31] RIOS J, HERNANDEZ J C, OLIVA M, et al. Product Avatar as Digital Counterpart of a Physical Individual Product: Literature Review and Implications in an Aircraft [C]//22nd ISPE Inc. International Conference on Concurrent Engineering (CE2015). [S.l.]:[s.n.],2015.
- [32] LEE J, LAPIRA E, BAGHERI B, et al. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment[J]. *Manufacturing Letters*, 2013,1(1):38-41.
- [33] 林润泽,王行健,冯毅萍,等.基于数字孪生的智能装配机械臂试验系统[J]. *实验室研究与探索*, 2019,38(12):83-88.
- [34] 梁生龙.数字化双胞胎技术在燃气轮机生产参数校正中

- 的应用[J].山东农业大学学报(自然科学版),2020,51(5):924-927.
- [35] 孙惠斌,潘军林,张纪铨,等.面向切削过程的刀具数字孪生模型[J].计算机集成制造系统,2019,25(6):1474-1480.
- [36] GOHARI H, BERRY C, BARARI A. A Digital Twin for Integrated Inspection System in Digital Manufacturing[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(10):182-187.
- [37] DEBROY T, ZHANG W, TURNER J, et al. Building digital twins of 3D printing machines[J]. Scripta Materialia, 2017,135(1):119-124.
- [38] 丁华,杨亮亮,杨兆建,等.数字孪生与深度学习融合驱动的采煤机健康状态预测[J].中国机械工程,2020,31(7):815-823.
- [39] KRAFT J, KUNTZACK S. Engine fleet-management: the use of digital twins from a MRO perspective[C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. North Carolina, the United States: American Society of Mechanical Engineer, 2017.
- [40] 宋悦,时祎瑜,于劲松,等.基于数字孪生的光电探测系统性能预测[J].计算机集成制造系统,2019,25(6):1559-1567.
- [41] 赵亮,高龙,陶剑.数字孪生技术在航空产品寿命预测中的应用[J].国防科技工业,2019(5):42-44.
- [42] 桂卫华,曾朝晖,陈晓方,等.知识驱动的流程工业智能制造[J].中国科学:信息科学,2020,50(9):1345-1360.
- [43] 桂卫华,王成红,谢永芳,等.流程工业实现跨越式发展的必由之路[J].中国科学基金,2015,29(5):337-342.
- [44] ZHOU X, EEBECK A, LIM M Q, et al. An agent composition framework for the J-Park Simulator-A knowledge graph for the process industry[J]. Computers & Chemical Engineering, 2019, 130:106577.
- [45] KOCKMANN N. Digital methods and tools for chemical equipment and plants[J]. Reaction Chemistry & Engineering, 2019, 4(8):1-8.
- [46] BEVILACQUA M, BOTTANI E, CIARAPICA F E, et al. Digital Twin Reference Model Development to Prevent Operators' Risk in Process Plants[J]. Sustainability, 2020(12):1-17.
- [47] 李彦瑞,杨春节,张瀚文,等.流程工业数字孪生关键技术探讨[J].自动化学报,2021,47(3):501-504.
- [48] CAI Y, STARLY B, COHEN P, et al. Sensor Data and Information Fusion to Construct Digital-twins Virtual Machine Tools for Cyber-physical Manufacturing[J]. Procedia Manufacturing, 2017(10):1031-1042.
- [49] CHEN W. Intelligent manufacturing production line data monitoring system for industrial internet of things[J]. Computer Communications, 2019(151):31-41.
- [50] 唐竟.数字孪生在航空机电产品装配工艺中的应用研究(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net
- [J].航空制造技术,2019,62(15):22-30.
- [51] 周倩.如何突破离散工业的数字化瓶颈[J].中国工业评论,2017(5):76-82.
- [52] 田锋,段海波,杨振亚,等.数字孪生体技术白皮书[M].北京:机械工业出版社,2019.
- [53] 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.
- [54] 邢学快,王直杰,沈亮亮,等.采用PLC数据匹配的MCD风力发电机虚拟仿真监控[J].智能工业与信息安全,2016,35(9):3-5.
- [55] 王飞跃.平行控制与数字孪生:经典控制理论的回顾与重铸[J].智能科学与技术学报,2020,2(3):293-300.
- [56] 李欣,刘秀,万欣欣.数字孪生技术及安全发展综述[J].系统仿真学报,2019,31(3):385-392.
- [57] 唐文虎,陈星宇,钱瞳,等.面向智慧能源系统的数字孪生技术及其应用[J].中国科学工程,2020,22(4):74-85.
- [58] 刘大同,郭凯,王本宽.数字孪生技术综述与展望[J].仪器仪表学报,2018,39(11):1-10.
- [59] 路清,吴双,赵喆.数字孪生技术在飞机设计验证中的应用[J].民用飞机设计与研究,2020(3):1-8.
- [60] 于勇,胡德雨,戴晟,等.数字孪生在工艺设计中的应用探讨[J].航空制造技术,2018,61(18):26-33.
- [61] 肖莹莹,王玫,郭丽琴,等.基于数字孪生的智能制造管理计划[J].系统仿真学报,2019,31(11):2323-2334.
- [62] 樊留群,丁凯,刘广杰.智能制造中的数字孪生技术[J].制造技术与机床,2018(7):61-66.
- [63] 陶飞,戚庆林.面向服务的智能制造[J].机械工程学报,2018,54(16):11-23.
- [64] 任涛,于劲松,唐获音,等.基于数字孪生的机载光电探测系统性能退化建模研究[J].航空兵器,2019,26(2):75-80.
- [65] 赵浩然,刘检华,熊辉,等.面向数字孪生车间的三维可视化实时监控方法[J].计算机集成制造系统,2019,25(6):1432-1443.

作者简介:吴雁,博士,副教授,主要研究方向为先进制造技术、复杂曲面零件CAD/CAM。

王晓军,通信作者,硕士研究生,主要研究方向为数字化制造。

E-mail:wuyan613613@126.com;2293555311@qq.com

收稿日期:2021-01-06

http://www.cnki.net