

DOI:10.13433/j.cnki.1003-8728.20190156

引用格式:

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

数字孪生在制造中的应用进展综述

郭亮,张煜

(西南石油大学 机电工程学院,成都 610500)

摘要:随着工业 4.0、CPS、智能制造等研究的深入,如何解决制造中物理世界与信息世界之间的交互共融成为进一步推进制造业变革的核心问题。在此背景下,学术界和工业界提出了数字孪生的概念及技术体系,用于解决上述难题。为了全面了解数字孪生研究进展,首先梳理了数字孪生的基本概念,综述了其在航空航天、产品、制造设备及制造车间等阶段的应用进展,重点分析了数字孪生与物联网、大数据、CPS 之间的联系与区别,最后指出了数字孪生在制造领域的发展趋势。

关键词:数字孪生;物联网;大数据;信息物理系统

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-8728(2020)04-0590-09

Review on Application Progress of Digital Twin in Manufacturing

Guo Liang, Zhang Yu

(School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: With the development of Industry 4.0, CPS and Intelligent manufacturing, how to solve the interaction and integration between the physical world and the information world in manufacturing has become a key problem that further promote the transformation of manufacturing industry. In this context, the concept and technical system of digital twin to solve the above-mentioned problems was put forward in the research and industry. In order to get a comprehensive understanding of digital twin research progress, the basic concept of digital twin is sorted out, and the application progress of digital twin are summarized from the aerospace, product, manufacturing equipment and manufacturing workshop. The relationship and difference among the digital twin and Internet of things, big data and CPS are analyzed. Finally, the development trend of digital twin in manufacturing are pointed out.

Keywords: digital twin; internet of things; big data; cyber-physical system

随着信息技术与通信技术的快速发展,欧美各国推出以“工业互联网”和“工业 4.0”为核心的制造业升级计划,我国也在 2015 年提出了“中国制造 2025”发展战略,并将智能制造作为“中国制造

2025”的主攻方向^[1-2]。

为解决制造业向智能制造发展的关键技术问题,例如通讯、计算、数据采集与分析等问题,学术界围绕物联网(Internet of things, IoT)、大数据(Big data)和信息物理系统(Cyber-physical systems, CPS)等相关技术领域开展了大量的研究工作。数字孪生也越来越多的被学者和工业企业所研究与运用^[3-5],数字孪生是物理实体的数字化描述,它的出现使得企业可以对物理实体进行全方位实时监测与控制。近年来数字孪生的概念和应用已经逐渐在智

收稿日期:2019-04-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51705438)与国家留学基金委员会(201708515160)资助

作者简介:郭亮(1985-),副教授,博士,研究方向为云制造,智能制造,gl@swpu.edu.cn

能设备和智能工厂中得到体现,同时 Gartner 公司也从 2017 年起连续三年将数字孪生技术列为十大战略技术趋势。本文将围绕数字孪生概念、研究进展进行详细综述,随后将数字孪生与其紧密相关的物联网、大数据、CPS 技术进行对比分析,最后指出数字孪生技术在制造领域的研究与应用趋势。

1 数字孪生技术

1.1 数字孪生的背景

数字孪生最早可以追溯到 2003 年密歇根大学 Michael Grieves 教授的产品全生命周期管理 (Product lifecycle management, PLM) 课程中^[5],初期的数字孪生包含三个部分:真实空间、虚拟空间以及两者的数据流连接,如图 1 所示。

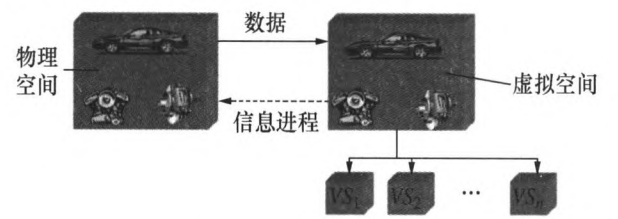


图 1 数字孪生的构成^[5]

但当时并未将此概念称为数字孪生,Michael

Grieves 在 2003 ~ 2005 年将这一概念模型称为“镜像空间模型”(Mirrored spaced model),在 2006 ~ 2010 年将其称为“信息镜像模型”(Information mirroring model)^[3-4]。2011 年,Michael Grieves 与美国宇航局 John Vickers 合著的《几乎完美:通过 PLM 推动创新和精益产品》一书中正式将其命名为数字孪生^[6]。

美国宇航局为了解决飞行器开发过程中的潜在问题,开发了飞行器的硬件数字孪生体——“铁鸟”(飞控液压系统综合实验台架)作为飞行器的物理模型。随着模拟仿真技术的快速发展,美国宇航局对“铁鸟”进行了全面的数字化,工程师可以利用虚拟模型对过去所发生的事件进行分析或在飞行器建造前进行必要的测试^[7-9]。

1.2 数字孪生的定义

自 John Vickers 与 Michael Grieves 提出数字孪生以来,学术界从产品设计、制造到全生命周期管理等角度对数字孪生进行了定义,但由于制造系统涉及物理对象的多样性,因此很难给出数字孪生的具体定义。对于不同的物理对象,例如工件、制造设备、工厂和员工,需要匹配不同的数字孪生模型,以配合特定的结构、功能需求和建模策略。表 1 展示了学术界与工业界对数字孪生的相关定义。

表 1 学术/工业界对数字孪生的定义

机构/作者	年份	定义
美国空军研究实验室和 NASA ^[10]	2011	一种面向飞行器或系统的高集成度多物理场、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与该模型对应实体的功能、实时状态及演变趋势。
Edward Glaessgen, David Stargel ^[11]	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,飞行器历史等,镜像其相应飞行器数字孪生的生命。
Michael Grieves, John Vickers ^[5]	2017	数字孪生是从微观原子级到宏观几何级全面描述潜在生产或实际制造产品的虚拟信息结构。构建数字孪生的最佳结果是,任何可以通过检测实际制造产品所获得的信息,都可以从它的数字孪生中获得。
庄存波等 ^[6]	2017	产品数字孪生体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、超写实、动态概率的仿真模型,可用来模拟、监控、诊断、预测、控制产品物理实体在现实环境中的生产过程、状态和行为。
陶飞等 ^[12]	2018	数字孪生是产品全生命周期(PLM)的一个组成部分,利用产品生命周期中的物理数据、虚拟数据和交互数据对产品进行实时映射。
Haag Sebastian, Anderl Reiner ^[13]	2018	数字孪生是单个产品的全面数字化表示,它通过模型和数据包括实际生命对象的属性、条件以及行为,数字孪生是一组可以模拟它在已部署环境中实际行为的现实模型。

2 数字孪生技术国内外应用现状

基于 Web of Science 数据库统计发现,数字孪生的相关研究在近年呈现快速增长趋势,如图 2 所示。数字孪生的应用探索首先出现在航空航天领域,其重点是结构力学^[10]、材料科学^[14]和对飞行器的长时间性能预测^[15]。随着工业 4.0、智能制造等研究的深入,数字孪生的应用探索逐渐向产品、制造设备和制造车间转移。表 2 总结了国内外学者从 2011 年至今数字孪生在飞行器、产品、制造设备和制造车间的相关研究情况。陶飞团队将数字孪生划分三个阶段^[16],从 2003 年 Grieves 提出数字孪生的模糊概念开始到 2011 年是数字孪生的形成阶段,从

2012 年 NASA 给出数字孪生的定义到 2014 年第一份数字孪生白皮书正式发表是数字孪生的孵化阶段,2014 年至今是数字孪生的发展阶段。

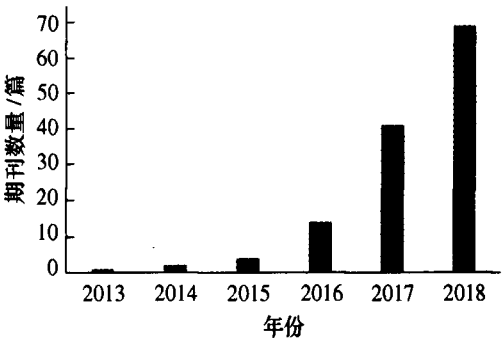


图 2 2013~2018 年数字孪生文献数量

表 2 国内外数字孪生研究情况

应用对象	年份	研究内容	目标
飞行器	2011~至今	1.利用超高保真模型,对飞行过程中的局部损伤和组织变化进行探测;	1.减少结构件“意外”失效;
		2.结合数字孪生模型对飞行器进行实时监测;	2.飞行器损伤(疲劳裂纹、复合材料蠕变等)预测;
产品	2015~至今	3.利用数字孪生模型对飞行器健康状况进行评估。	3.飞行器寿命预测;
			4.飞行器状态管理。
制造设备	2016~至今	1.利用数字孪生模型进行产品的个性化生产;	1.实现产品快速设计,提高生产效率;
		2.将产品数字孪生模型融入到产品设计与生产过程。	2.实现个性化产品定制;
制造过程/制造车间	2016~至今	3.对 3D 打印机建立数字孪生模型;	3.实现模块化设计和高度可伸缩性生产。
		2.对数控机床建立数字孪生模型;	1.减少实验次数和生产缺陷;
		3.对自动导引运输车(AGV)建立数字孪生模型。	2.对机器故障进行诊断和预测;
			3.实现自动控制、参数可视化以及实时状态监控;
		1.探索产品数字孪生模型在制造过程中的应用;	4.准确定位与自动路径规划。
		2.探索制造车间虚拟化的机制与实现方法;	1.自动规划产品生产、装配过程,优化生产资源;
		3.探索数字孪生在中小制造企业中的应用。	2.提高车间制造设备工作效率,优化生产过程;
			3.利用学习工厂实现制造业向智能制造升级。

2.1 数字孪生在飞行器中的应用

2011 年美国空军实验室的 Eric J.Tuegel 等^[10]利用超高保真的飞机数字孪生模型,根据飞行条件将飞机结构变形和温度变化结合,在虚拟模型中模拟对飞机结构造成的局部损伤和组织变化,以保证飞机结构的完整性并对飞机结构进行寿命预测。Hochhalter 等^[17]和 Tuegel 等^[18]分别采用数字孪生与感官粒子技术(Sensory particles technology)结合和基于数字孪生的机体分析,实现了飞行器的实时检测与维护,降低了飞行器的维护成本。Chenzhao Li 等^[19]利用动态贝氏网络,开发出基于飞机的数字孪生模型,建立了一种通用的诊断和预测概率方法。

孪生模型通过收集每架飞机的制造与材料特性、任务历史等来对飞机的健康状况进行评估,并以飞机机翼疲劳裂纹扩展为例进行了分析。由于航空航天工业始终保持着相当高的自动化、数字化及仿真水平,因此数字孪生概念的产生和发展在过去很长一段时间都集中在航空航天领域,特别是利用数字孪生技术对飞行器进行故障预测和健康管理。但随着美国、欧盟、中国、日韩等世界主要国家和地区纷纷开始进行以智能制造为核心的制造业升级,以及云计算、大数据、物联网和传感器等信息技术的快速发展,数字孪生技术的探索与研究逐渐向制造业深度推进。

2.2 数字孪生在产品制造中的应用

现今企业的生产模式逐渐由大批量制造向小批量、个性化制造转变。实现个性化制造已成为智能制造的重要标志,而完成个性化制造的必要条件是实现制造产品的全面数字化。建立产品的数字孪生模型能够减少产品在设计、生产过程中消耗的时间,满足客户定制的需要,并对产品进行全生命周期管理以提高对市场需求的反应速度。大多数产品在设计过程中由于设计者无法和客户实现充分、快捷的沟通,设计者很难全方位考虑产品概念、美学以及主要功能的相互协调。陶飞等^[20]提出了一种基于数字孪生的产品设计模式,其中包含概念设计、详细设计和虚拟验证,使产品设计、制造和服务更加高效、智能和可持续。Soderberg 等^[21]利用一种产品装配过程的数字孪生模型,实现产品从规模生产到个性化生产的快速转变。Jumyung Um 等^[22]研究了基于CPS的通用数字孪生模型。利用这一模型可以允许产品数据在产品模拟、生产和制造阶段进行流通,以实现产品装配和制造过程的可扩展与高度模块化。Schleich Benjamin 等^[23]提出了关于物理产品的数字孪生综合参考模型,该综合模型具备重要的模型属性,如可伸缩性、互操作性、可扩展性和高保真度,并在产品设计与生产过程中能够对模型进行组合、分解、转换和评估。

产品数字孪生模型是在虚拟空间中对物理实体的实时映射,通过互联网、物联网获取物理实体的实时数据^[24],以及产品全生命周期中产生的各种信息。这些数据与信息可以用来改进产品的设计和功能,同时产品数字孪生模型可以对复杂产品的装配过程进行模拟,优化产品的设计参数。

2.3 数字孪生在制造设备中的应用

制造设备是生产加工过程的基本单元,对制造设备进行数字化、网络化、智能化改造是发展智能制造的必经之路。目前能够进行数字孪生改造的设备集中在数字化程度高、可以进行全自动或半自动加工的设备。DebRoy T 等^[25]探讨了一种基于数字孪生的增材制造技术,数字孪生模型允许将材料的微观结构变化、加热和冷却速率、凝固参数、残余应力和变形等物理参数集成到一个可跟踪的数值框架中,以减少部件的缺陷与实验次数。Cai Yi 等^[26]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集成进孪生模型中,以提高物理机床的可靠性和加工能力。Bruno Scaglioni 等^[27]以 Mandelli M5 机床的数字孪生模型为研究点,探索了基于有限元分析的机床结构件柔度、切削过程模型、传动链模型和控制系统模型。Darya Botkina 等^[28]开发了

切削刀具的数字孪生模型,通过收集刀具的数据信息来对刀具切削过程不断进行优化。Luo Weichao 等^[29]设计了一种网络化的机床状态监测平台。实现在移动设备上查看机床的三维模型和监控机床的实时状态,同时利用增强现实技术为用户提供机床加工过程的实时可视化。

目前基于数字孪生的制造设备研究主要是对现有的自动化设备进行数字孪生改造,从而使生产设备在故障预测和维护中比传统自动化设备拥有更强的竞争力。传统制造设备大多基于经验,基于几何、物理模型进行故障预测,但这些方法过于依赖经验数据,对偶发性、不确定性事件响应率低,而基于数字孪生的设备可以通过几何、物理、行为和规则建模来评估设备当前状态。因此开发具有数字孪生功能的制造设备,对制造业产业升级实现智能制造具有巨大的推动作用。

2.4 数字孪生在制造车间中的应用

车间与生产线级的数字孪生系统已经得到实际的探索与研究。自动化流水线在生产过程中将产生大量的数据流,创建一个关于制造车间的数字孪生对不同来源的数据进行收集与分析,如物理尺寸、制造信息、操作数据和分析软件的信息流等。如果运用得当,数字孪生模型可以非常精确地模拟实体制造及其运作方式。值得注意的是在某些复杂制造方案中单一产品的数字孪生模型并不适用,因此研究人员提出了过程数字孪生^[30]这一概念,过程数字孪生是产品数字孪生的扩展和更高层次。过程数字孪生除包含单一产品外,还包括整个生产环境,并使用虚拟现实、人工智能和高性能计算机来优化制造设备和整个生产过程。

陶飞等^[31-32]针对制造车间物理空间与虚拟空间的相互作用与融合,提出了数字孪生车间(Digital Twin Shop-Floor, DTS)的概念,并将数字孪生车间分为实体车间、虚拟车间、车间服务系统和车间孪生数据四个部分,并提出了DTS的运行机制和实现方法。Zhang Hao 等^[33]提出了一种基于数字孪生的中空玻璃生产线快速个性化设计方法,利用数字孪生模型融合系统模型和分布式实时过程数据,可以在生产前对系统进行权威的数字化设计。

由于成本或系统复杂性问题,全自动数据采集系统或方法无法在中小制造企业中得到广泛应用,但采集制造过程中的数据对数字孪生能否在制造企业中成功应用具有重要影响。中小企业由于在发展数字孪生方面的能力不足、发展优势尚不明显,导致中小企业进行数字孪生转型升级积极性不足。为此 Thomas H J 等^[34]建立了以数字孪生为基础的

学习工厂,满足中小企业对以数字孪生为基础的易用、可扩展、面向服务的控制系统的学习需求。同时为将生产员工视为综合控制系统的一部分, Graessler Iris 等^[35]开发出一种基于员工的数字孪生生产系统。除包含员工的技能与经验外,还包括员工情绪、性格等个性化属性,使系统具备更好的开放性和更高的舒适性。

3 数字孪生与物联网、大数据、CPS 关系分析

工业 4.0 是由物联网、大数据和 CPS 等新一代信息技术推动的下一轮工业浪潮,数字孪生作为未来智能制造的战略技术,能使企业具备实时洞察物理对象的能力。自数字孪生这一概念在航空航天工业正式提出和发展以来,数字孪生的概念随着时间的推移在不断的发生变化。一方面,有研究者认为数字孪生是仿真技术的下一代趋势^[36]。另一方面,有部分研究者则认为数字孪生代表了网络物理系统(CPS)发展的必要条件^[37]。本节在系统研究和调研的基础上,探讨了数字孪生与物联网、大数据以及 CPS 之间的相互关系。

3.1 数字孪生与物联网

近年来,随着嵌入式传感器、低功耗无线通信技术和高效信号处理技术的蓬勃发展^[38-40],物联网技术得到了爆炸性的发展与壮大。在探讨数字孪生与物联网的相互关系时,可以发现在数字孪生的不同定义中都将数据连接作为数字孪生的核心要素之一。其原因是数字孪生虚拟模型需要实时更新物理实体的数字信息,处理后的信息也必须从虚拟模型传输到物理实体,以实现物理实体与虚拟模型的双向实时映射。在数字孪生技术的基本应用中,实现虚拟模型与物理实体全方位同步是基本目标,在此基础上数字孪生才能实现数据分析和产品/设备优化等更高层次的目标。由于物联网技术具有识别、跟踪设备与物理对象的能力,能够提供设备的精确实时信息,降低通讯成本、简化业务流程、提高信息准确性和效率^[41-42]。因此基于现有的物联网技术发展数字孪生将是一个十分便利途径。

同时数字孪生虚拟模型需要实时更新物理实体的数字信息,由于虚拟模型对物理实体的行为做出分析与反馈的速度与信息流传输的速度密切相关,而物联网技术可以为数字孪生提供实时全面的数据采集以及虚拟模型和物理实体之间的有效互联互通。物联网技术包含无线传感器网络、无线网状网

络、无线局域网等多种异构网络,这些连接网络有利于提高数字孪生实体模型与虚拟模型间的通信能力、数据采集能力和数据存储能力。因此物联网技术是实现数字孪生的关键技术之一,图 3 展示了数字孪生与物联网之间的相互关系。

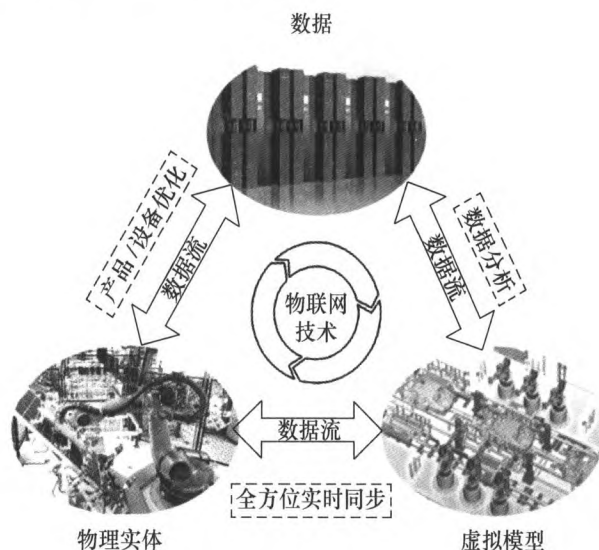


图 3 数字孪生与物联网的内在联系

此外,数字孪生技术还应集成人工智能、大数据分析和大数据可视化等技术,为设备操作者和设备供应商提供更具说明性和可靠性的实时监测与交互服务。

3.2 数字孪生与大数据

根据国际数据公司(IDC)的报告,在 2011 年全球创造和复制的数据量是 1.8 ZB ($\approx 1021\text{B}$),并在过去五年中增涨了近 9 倍^[43-44]。应该认识到大数据的重要性不仅在于数据量的巨大,而且在于数据中所蕴含的巨大价值。大数据起源于数据的指数级增长,而数字孪生则是为了满足物理空间与虚拟空间之间的互联互通。大数据与数字孪生产生的大背景是相同的,即新一代信息技术的应用和普及。国内北航陶飞团队^[45]将数字孪生与大数据的背景、概念、有益作用等进行了详细的对比。

大量结构化、半结构化和非结构化数据^[46]可以通过大数据分析识别行为特征和模式,洞察行为趋势、帮助用户做出决策。如图 4 所示,数据也是数字孪生的重要组成部分,数字孪生在产品全生命周期的应用中,每一阶段都需要物理实体与虚拟模型的持续互动和虚拟模型的迭代优化,而这一过程的媒介就是各种各样的数据。在实际应用中,数字孪生与大数据对制造业产生的有益效果是高度重叠的,如提高生产、管理效率,预测产品、设备的故障风险及寿命预测等。

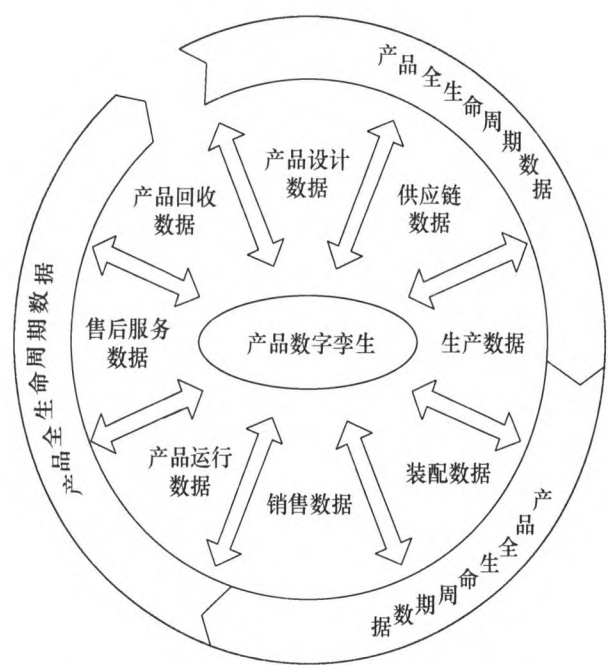


图 4 产品数字孪生需要收集、处理与分析的数据

大数据的数据融合是产品生命周期中单个阶段各种数据的融合,设计者、制造者和维修人员不来自同一企业,因此某一阶段的数据只能用于该阶段。并且由于企业对自身利益和数据共享安全性的担忧,使得大数据无法实现在产品全生命周期中数据的连续流动。而数字孪生则可以收集、记录、积累和处理从产品设计到退役的所有数据,因此数字孪生不仅有利于产品的设计制造、使用和维修保养,也有助于下一代产品的开发^[47]。数字孪生与大数据的差异在于,数字孪生能够在虚拟世界中直观地运行和验证制造过程,在人机交互与产品全生命周期管理上比大数据更灵活更全面,而大数据在数据处理和分析上比数字孪生更专业、高效。

虽然大数据与数字孪生是两种不同的应用技术,并各有其优点。但将大数据技术应用于孪生数据的处理和分析则可以实现大数据技术和数字孪生的优势互补,共同促进数字孪生系统向智能化发展。因此本文将大数据技术作为实现数字孪生智能化的关键技术。

3.3 数字孪生与 CPS

在探讨数字孪生和 CPS 的关系时,有必要对 CPS 做一个简短的概述。2006 年美国国家科学基金会 (National science foundation, NSF) 正式提出 CPS 的概念,2008 年 Shankar Sastry^[48] 给出了一个复杂的 CPS 定义,CPS 集成了计算、通信和存储,可以监控和控制物理实体,同时必须可靠、安全、高效、实时。在制造领域,CPS 是实现智能制造的关键技术,它与云计算、物联网、大数据等技术有着密切关系。

一个被学者所广泛认同的观点是,CPS 主要包括两个组成部分:

- 1) 可靠的连接性,确保从物理世界获得实时数据和从网络空间获得信息反馈;
- 2) 以智能数据管理、分析和计算为核心的网络空间。

CPS 更加详细的构成则包括:智能连接、数据分析、网络连接、认知与决策、执行^[49]。首先物理对象数据通过传感器进行测量或从控制器和企业制造系统中直接获取;数据分析将已获得的数据转化为可以理解和显示的信息;网络是 CPS 的信息中心,信息从单一信息汇聚成机器网络;认知与决策帮助用户利用已有的经验和知识对结果做出正确的处理;最后通过执行层实现虚拟模型到物理实体的反馈并控制物理对象动作。

比较数字孪生与 CPS 的概念和定义时可以发现两者都强调物理对象、虚拟系统数据以及物理对象与虚拟系统之间的互联互通,最终目标都是对物理对象或过程进行优化。数字孪生更专注于物理实体与虚拟模型的实时映射,而 CPS 则是针对整个制造系统包括产品、设备和车间等的信息收集、处理和反馈控制。因此可以将数字孪生视为一种简化的 CPS 系统,图 5 展示了数字孪生与 CPS 的层级关系,即 CPS 的基本构成中包含了数字孪生是数字孪生的更高层次。

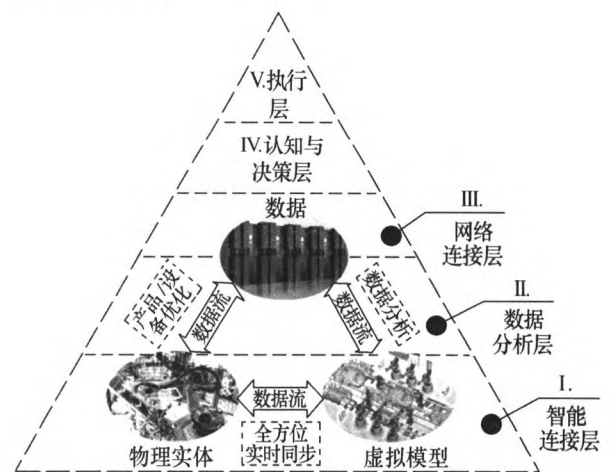


图 5 CPS 的 5C 体系结构与数字孪生

数字孪生的发展需要经历同步、数据分析、优化三个阶段。

- 1) 实现物理实体和虚拟模型的双向实时映射是数字孪生的基本目标,这需要通过物联网技术从设备主控系统和与设备直接相连的传感器中获取数据和传递数据;
- 2) 获取到物理实体和虚拟模型中的数据后,需要利用大数据处理方法来挖掘孪生数据的隐藏信息

或分析物理对象的演变过程。尤其当数字孪生对象从单一设备跨越到整个生产车间或生产系统时,通过物联网所获取的数据将会是巨大和复杂的。因此利用大数据技术对孪生数据进行处理和分析将会得到更全面和更具价值的信息;

3) 数字孪生对制造过程的优化,展现了 CPS 系统的部分目标:即构成一个综合物理实体、网络和

计算的多维复杂系统,并对产品、设备和生产系统进行实时感知、动态控制与服务优化。

如图 6 所示,物联网即是实现数字孪生的关键技术也是实现 CPS 系统的关键技术,大数据作为一种数据处理和分析技术运用在数字孪生和 CPS 系统中,以实现更好的数据处理和分析,数字孪生则可以被视为是 CPS 系统的一部分。

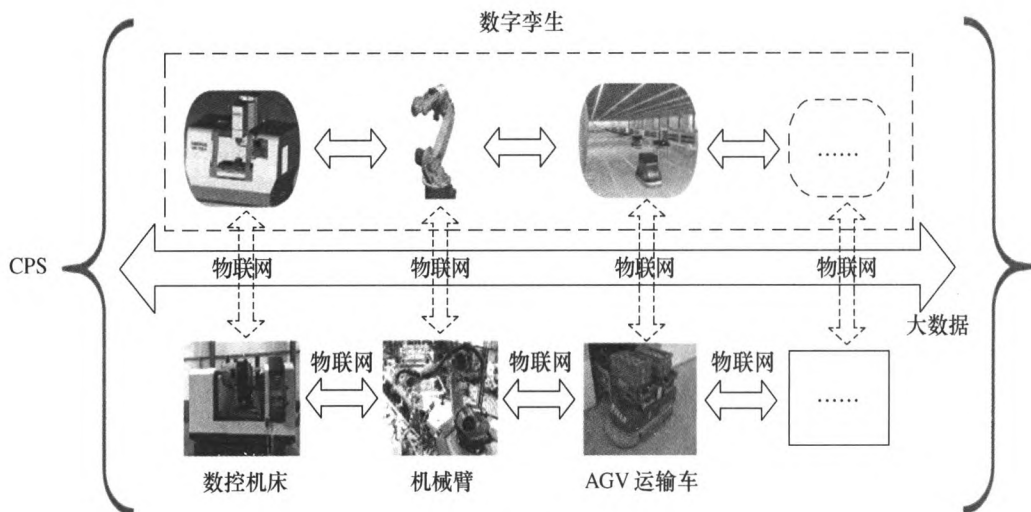


图 6 数字孪生与物联网、大数据和 CPS 系统的相互关系

4 数字孪生发展趋势

目前,数字孪生的研究与应用处于初级阶段,在工业应用方面仍然存在许多研究挑战,如建模技术、数据分析、信息安全和隐私保护等。数字孪生的发展离不开物联网、大数据等新一代信息技术的支持,要实现数字孪生的高速发展,构建一个高效、健壮的数字孪生系统,应当将数字孪生与新一代信息技术进行融合。分析当前数字孪生的发展现状,本文总结了数字孪生在技术层与应用层的发展趋势。

4.1 数字孪生在技术层面发展趋势

1) 现有的建模与模拟技术无法兼容,也无法查看模型全生命周期的所有信息。目前缺乏一种专有格式将物理实体的工程数据与模型进行整合,因此怎样构建一个涵盖产品全生命周期管理、制造系统执行和车间运营管理的数字孪生模型将是一个重要的研究趋势。

2) 可以预见未来的孪生数据将具有多格式、高重复性和海量等特征,怎样将大数据分析融入到数字孪生模型中,避免生产设备的实时数据对历史数据的覆盖,实现智能分析和预测。同时怎样将不同部门,如机械设计、电气设计、气动结构和控制单元等不同结构的数据进行融合,实现基于孪生模型的虚拟调试将是另一个研究趋势。

3) 智能决策系统的构建也将是一个研究趋势。数字孪生应当是一个可以不断积累设计和制造知识的系统,这些知识可以重复使用和不断改进。在虚拟模型与实际生产结果存在差异或物理实体与虚拟模型出现不同步时,决策系统需要根据已有的知识做出最优的反馈控制。

4) 数字孪生系统的安全性也将是一个重要的研究趋势。数字孪生拥有整个生产系统的所有核心数据,因此数字孪生系统或平台极易被攻击和窃取。典型的案例包括:2011 年伊朗核设施遭到电脑病毒“震网”选择性攻击;2012 年,SaudiAramco 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^[50]。因此,有必要认识到安全性不是数字孪生的一个附加功能,它必须从整个孪生系统设计阶段就得到很好的开发与整合。

4.2 数字孪生应用层面发展趋势

1) 在产品研发方向,如何利用数字孪生模型构建新型仿真系统,实现产品状态信息与数字孪生模型同步更新,在产品开发过程中及时发现产品设计、生产的缺陷,实现产品设计优化;

2) 在产品制造加工方向,如何构建工厂级别的设备集群数字孪生模型,实现产品全加工过程的实时监控、过程优化和远程控制;

3) 在产品运维方向,如何应用数字孪生实现产

品运行维护,特别是机械系统的日常运行维护,比如电梯系统、汽车系统、大型装备等;

4) 同时应该注意到在许多制造企业,尤其是中小型企业并不具备完全数字化的能力,仅能对部分设备进行数字化,如智能仓库或供应链管理。因此如何将数字孪生在弱数字化企业进行应用也将是一个重要的研究方向。

5 结束语

数字孪生概念是 Michael Grieves 在产品全生命周期管理课程中提出的,但由于信息技术的发展没有达到数字孪生在制造业中的应用要求,使得数字孪生在过去很长一段时间的探索被局限于航空航天领域。在全球新一轮科技革命和制造业产业升级的推动下,信息技术得到了爆发式的发展。物联网与大数据作为数字孪生在信息采集与数据处理、分析领域的关键技术,也得到了学术界,甚至是全社会的高度关注。未来物理实体的虚拟化与信息化将会成为世界发展的重要趋势,同时由于数字孪生在实现物理对象与虚拟模型实时双向映射中的巨大优势,因此可以预见数字孪生技术将在推动智能制造方面拥有巨大的应用前景。

[参考文献]

- [1] 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
Zhou J. Intelligent manufacturing——main direction of "Made in China 2025" [J]. China Mechanical Engineering, 2015,26(17):2273-2284 (in Chinese)
- [2] 唐堂,滕琳,吴杰,等.全面实现数字化是通向智能制造的必由之路——解读《智能制造之路:数字化工厂》[J].中国机械工程,2018,29(3):366-377
Tang T, Teng L, Wu J, et al. Full digitization is the only way to intelligent manufacturing-interpretation of "intelligent manufacturing road: digital factory" [J]. China Mechanical Engineering, 2018,29(3):366-377 (in Chinese)
- [3] Grieves M W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises [J]. International Journal of Product Development, 2005, 2(1-2):71-84
- [4] Githens G. Product lifecycle management: driving the next generation of lean thinking by Michael Grieves[J]. The Journal of Product Innovation Management, 2007, 24(3):278-280
- [5] Grieves M, Vickers J. Digital Twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]//Kahlen F J, Flumerfelt S, Alves A. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Switzerland: Springer, 2017:85-113
- [6] 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
Zhuang C B, Liu J H, Xiong H, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4):753-768 (in Chinese)
- [7] Rosen R, von Wichert 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
- [8] NASA. NASA working on early version of 'Star-Trek'-like main ship computer[EB/OL]. https://www.nasa.gov/vision/earth/technologies/Virtual_Iron_Bird_jb.html, 2018-10-20
- [9] 张玉良,张佳朋,王小丹,等.面向航天器在轨装配的数字孪生技术[J].导航与控制,2018,17(3):75-82
Zhang Y L, Zhang J P, Wang X D, et al. Digital twin technology for spacecraft on-orbit assembly [J]. Navigation and Control, 2018, 17(3):75-82 (in Chinese)
- [10] Tugel E J, Ingrassia A R, Eason T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2011, 2011:Article ID 154798
- [11] 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. Honolulu, Hawaii: AIAA, 2012
- [12] Tao F, Cheng J F, Qi Q L, et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018,94(9-12):3563-3576
- [13] Haag S, Anderl R. Digital twin-proof of concept[J]. Manufacturing Letters, 2018,15:64-66
- [14] Shafto M, Conroy M, Doyle R, et al. Modeling, simulation, information technology & processing roadmap[EB/OL]. (2018-10-20). https://www.nasa.gov/pdf/501321main_TA11-ID_rev4_NRC-wTASR.pdf
- [15] 陈振,丁晓,唐健钧,等.基于数字孪生的飞机装配车间生产管控模式探索[J].航空制造技术,2018,61(12):46-50
Chen Z, Ding X, Tang J J, et al. Digital twin-based production management and control mode for aircraft assembly shop-floor [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018,61(12):46-50 (in Chinese)
- [16] Tao F, Zhang H, Liu A, et al. Digital twin in industry: state-of-the-art [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019,15(4):2405-2415
- [17] Cerrone A, Hochhalter J, Heber G, et al. On the Effects of modeling as-manufactured geometry: toward digital twin [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2014,2014:Article ID 439278
- [18] Tugel E J, Ingrassia A R, Eason T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2011, 2011:Article ID 154798

- [19] Li C Z, Mahadevan S, Ling Y, et al. Dynamic Bayesian network for aircraft wing health monitoring digital twin[J]. *AIAA Journal*, 2017,55(3):930-941
- [20] Tao F, Sui F Y, Liu A, et al. Digital twin-driven product design framework [J]. *International Journal of Production Research*, 2019,57(12):3935-3953
- [21] Söderberg R, Wärnefjord K, Carlson J S, et al. Toward a digital twin for real-time geometry assurance in individualized production [J]. *CIRP Annals*, 2017,66(1):137-140
- [22] Um J, Weyer S, Quint F. Plug-and-simulate within modular assembly line enabled by digital twins and the use of automationML[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2017,50(1):15904-15909
- [23] Schleich B, Anwer N, Mathieu L, et al. Shaping the digital twin for design and production engineering[J]. *CIRP Annals*, 2017,66(1):141-144
- [24] 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
Dai S, Zhao G, Yu Y, et al. Trend of digital product definition: from mock-up to twin [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2018,30(8):1554-1562 (in Chinese)
- [25] Debroy T, Zhang W, Turner J, et al. Building digital twins of 3D printing machines[J]. *Scripta Materialia*, 2017,135:119-124
- [26] 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
- [27] Scaglioni B, Ferretti G. Towards digital twins through object-oriented modelling: a machine tool case study[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2018,51(2):613-618
- [28] Botkina D, Hedlind M, Olsson B, et al. Digital Twin of a cutting tool[J]. *Procedia CIRP*, 2018,72:215-218
- [29] Luo W C, Hu T L, Zhang C R, et al. Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy [J]. *Journal of Ambient Intelligence & Humanized Computing*, 2019, 10(3):1129-1140
- [30] Sierla S, Kyrki V, Aarnio P, et al. Automatic assembly planning based on digital product descriptions [J]. *Computers in Industry*, 2018,97:34-46
- [31] Tao F, Zhang M. Digital twin shop-floor: a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing[J]. *IEEE Access*, 2017,5:20418-20427
- [32] 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 F, Zhang M, Cheng J F, et al. Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(1):1-9 (in Chinese)
- [33] Zhang H, Liu Q, Chen X, et al. A digital twin-based approach for designing and multi-objective optimization of hollow glass production line[J]. *IEEE Access*, 2017, 5:26901-26911
- [34] Uhlemann T H J, Lehmann C, Steinhilper R. The digital twin: realizing the cyber-physical production system for industry 4.0[J]. *Procedia CIRP*, 2017,61:335-340
- [35] Graessler I, Poehler A. Intelligent control of an assembly station by integration of a digital twin for employees into the decentralized control system [J]. *Procedia Manufacturing*, 2018,24:185-189
- [36] Rosen R, Von Wichert 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
- [37] Uhlemann T H J, Schock C, Lehmann C, et al. The digital twin: demonstrating the potential of real time data acquisition in production systems [J]. *Procedia Manufacturing*, 2017,9:113-120
- [38] van Kranenburg R. The internet of things: a critique of ambient technology and the All-seeing network of RFID [EB/OL]. (2018-10-20). <http://ss.zhizhen.com/detail.2018>
- [39] Xu L D, He W, Li S C. Internet of things in industries: a survey [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014,10(4):2233-2243
- [40] He Y, Guo J C, Zheng X L. From surveillance to digital twin: challenges and recent advances of signal processing for industrial internet of things [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2018,35(5):120-129
- [41] Gupta A, Tsai T, Rueb D, et al. Forecast: internet of things-endpoints and associated services, worldwide, 2017[Z]. 2017
- [42] Sun C L. Application of RFID technology for logistics on internet of things [J]. *AASRI Procedia*, 2012, 1:106-111
- [43] Fan J Q, Han F, Liu H. Challenges of big data analysis[J]. *National Science Review*, 2014,1(2):293-314
- [44] Jagadish H V, Gehrke J, Labrinidis A, et al. Big data and its technical challenges[J]. *Communications of the ACM*, 2014,57(7):86-94
- [45] Qi Q L, Tao F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison[J]. *IEEE Access*, 2018,6:3585-3593
- [46] Issa N T, Byers S W, Dakshanamurthy S. Big data: the next frontier for innovation in therapeutics and healthcare[J]. *Expert Review of Clinical Pharmacology*, 2014,7(3):293-298
- [47] Wang L H, Törngren M, Onori M. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2015,37:517-527
- [48] Sanislav T, Miclea L. Cyber-physical systems-Concept, challenges and research areas [J]. *Control Engineering and Applied Informatics*, 2012,14(2):28-33
- [49] Lee J, Bagheri B, Kao H A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems[J]. *Manufacturing Letters*, 2015,3:18-23
- [50] Monostori L. Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges[J]. *Procedia CIRP*, 2014,17:9-13