

文章编号: 2096-3424(2022)02-0176-09

DOI: 10.3969/j.issn.2096-3424.2022.02.011

数字孪生技术的研究现状分析

杨一帆¹, 邹 军^{1,2,3}, 石明明¹, 李月峰¹, 杨波波¹,
王洪荣², 施成章², 金龙悦², 路 鑫²

(1. 上海应用技术大学 理学院, 上海 201418; 2. 上海赞匠智能科技有限公司, 上海 201418;
3. 江苏派锐电子有限公司, 江苏 南通 226000)

摘 要: 随着网络、通信技术、传感器技术、人工智能等技术的不断进步, 智能工业领域蓬勃发展, 而作为新兴技术的翘楚——数字孪生技术也成为了下一代工业智能化的新方向。结合数字孪生技术的基本概念、技术特征、应用前景以及发展趋势等进行了梳理, 分析归纳了数字孪生技术在不同应用领域中的共同核心概念、关键技术和应用前景等以及数字孪生技术与其他相对应的物联网技术如人工智能、工业大数据等之间的关系, 展示了其在产业智能化未来发展的前景。

关键词: 数字孪生; 关键技术; 应用场景

中图分类号: TP29 **文献标志码:** A

Analysis of the Research Status of Digital Twin Technology

YANG Yifan¹, ZOU Jun^{1,2,3}, SHI Mingming¹, LI Yuefeng¹, YANG Bobo¹,
WANG Hongrong², SHI Chengzhang², JIN Longyue², LU Xin²

(1. School of Sciences, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;
2. ShanghaiZhijiang Intelligent Technology Co., Ltd., Shanghai 201418, China;
3. Jiangsu Pairui Electronics Co., Ltd., Nantong 226000, Jiangsu, China)

Abstract: With the continuous advancement of networks, communication technology, sensor technology, artificial intelligence and other technologies, the field of intelligent industry is booming. As the leader of emerging technologies, digital twin technology has also become the new direction for the next generation of industrial intelligence. Based on this current situation, and with the combination of the basic concepts, technical features, application prospects, and development trends of digital twin technology, this paper analyzes and summarizes the common core concepts key technologies and application prospects of digital twin technology in different application fields, as well as the relationship between digital twin technology and other corresponding IoT technologies such as artificial intelligence, industrial big data. The prospects for the future development of industrial intelligence are illustrated through the research.

Key words: digital twins; key technology; application scenarios

收稿日期: 2020-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(61901270); 浙江省科技计划项目(2018C01046)资助

作者简介: 杨一帆(1997-), 男, 硕士研究生。E-mail: 493712389@qq.com

通信作者: 王洪荣(1972-), 男, 硕士, 主要研究方向为智能光电、自动化控制。E-mail: wanghr@shzhijiang.cn

施成章(1982-), 男, 硕士, 主要研究方向为基于数字孪生的智能制造等。E-mail: shicz@shzhijiang.cn

引文格式: 杨一帆, 邹军, 石明明, 等. 数字孪生技术的研究现状分析 [J]. 应用技术学报, 2022, 22(2): 176-184+188.

Citation: YANG Yifan, ZOU Jun, SHI Mingming, et al. Analysis of the Research Status of Digital Twin Technology[J]. Journal of Technology, 2022, 22(2): 176-184+188.



数字孪生最早的诞生没有一个准确的时间,但是在2002年 Michal Grieves 博士在密歇根大学 PLM 中心生命周期(product lifecycle management, PLM)的一次演讲中首次提出了 PLM 概念模型。PLM 模型中出现了2个关键特性:现实空间、虚拟空间,这2个关键特性也为日后数字孪生技术的发展打下了基础,而在当时该模型已经具备了早期数字孪生的基本要素,并且该模型分别在2006年和2011年被称之为“镜像空间模型”、“信息镜像模型”^[1]。

同年, Michael Grieves 和 John Vickers 发布了一份白皮书《几乎完美:通过 PLM 驱动创新和精益产品》中正式的引入了术语“数字孪生”,并定义数字孪生的概念为充分利用物理模型、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,在虚拟空间中完成映射,从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程。

Michael Grieves 和 John Vickers 发表的这本白皮书是首次公开对数字孪生技术做出了一个全方面的定义,该定义规范了数字孪生技术的基本雏形。

同年3月,在美国空军研究室结构力学部门(air force research laboratory, AFRL),演讲的“基于状态的维护+结构完整性&战斗机机体数字孪生”中,AFRL 拟使用数字孪生技术来对战斗机进行虚拟建模和仿真。通过数字孪生技术,AFRL 可以将战斗机中的多源异构零件(包括机头、机身、机翼等)通过高保真的虚拟建模方式映射到计算机中,并建立与战斗机实体相对应的虚拟模型。通过战斗机实体和战斗机虚拟模型之间的双向交互联系,AFRL 可以不用考虑战斗机昂贵的试错代价,仅在研究所内通过实时观察虚拟模型来得到战斗机飞行时的运行状态、安全风险、零件磨损、机体外综合情况等^[2],如图1所示。

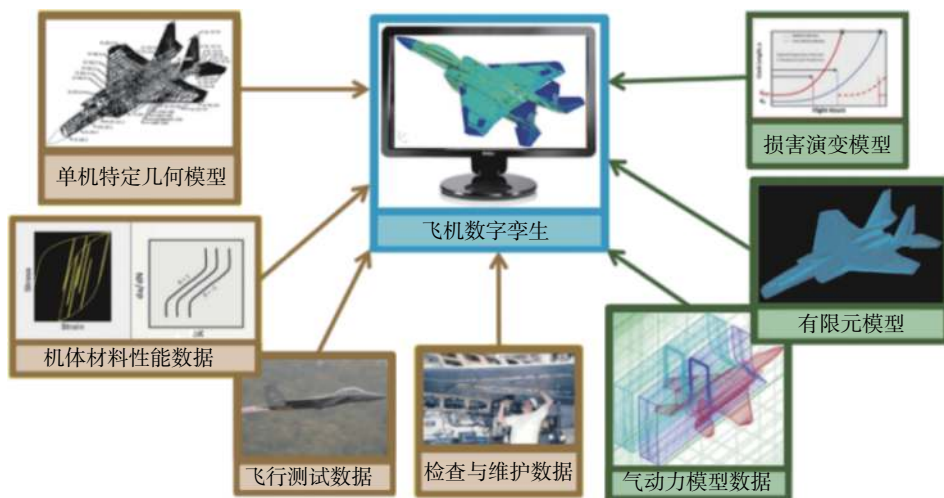


图1 飞机数字孪生体^[1]

Fig. 1 Airplane digital twin^[1]

几乎同一时间,美国通用电气公司(General Electric Company, GE)在为美国国防部提供 F-35 联合攻击机解决方案的时候,也发现了数字孪生的价值,并开始了对数字孪生技术的研究和应用。美国通用电气公司成为首家将数字孪生与工业数字化联系起来的,并开始利用数字孪生去构建工业互联网体系。之后,AFRL 在2013年发布的 Spiral 1 计划就是其中重要的一步,并与美国通用电气签订了2000万美元的商业合同以开展此项工作。

2016 年底全球知名的 IT 研究与顾问咨询公司 Gartner 在其发布的《2017 年十大发展趋势》中指出“数以亿计的物件很快将以数字孪生来呈现”,

使这一概念受到广泛关注,进入公众视野。而在实现制造强国战略的行动纲领《中国制造 2025》中智能制造的地位被明确提出:“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”,而数字孪生也是当之无愧的智能制造的核心技术。^[3]

数字孪生技术作为一项新兴技术,目前在智能制造的领域初露锋芒,但在未来,工业领域的智能化必然会依托数字孪生技术来实现。

1 数字孪生的定义

数字孪生作为一门新兴的技术,即是通过计算机进行高精度、多维度、全方面的动态仿真,将处

于物理世界的实体按照一定映射规则在虚拟世界中建立模型,并构建物理世界和虚拟世界的连接,实现物理世界和虚拟世界之间的实时交互通信、虚实互控、自我迭代优化和更新,如图2所示。



图2 数字孪生虚实模型

Fig. 2 Digital twin virtual-real model

国内,陶飞等^[4]定义数字孪生是以数字化的方式建立物理实体的多维、多时空尺度、多学科、多物理量的动态虚拟模型来仿真和刻画物理实体在真实环境中的属性、行为、规则等。刘大同等^[2]定义数字孪生为信息化平台内建立模拟一个物理实体流程或者系统。周瑜等^[5]认为数字孪生是指构建与物理实体完全对应的数字化对象的技术、过程和方法。

国外,ANSYS公司认为,数字孪生是在数字世界建立一个与真实世界系统的运行性能完全一致,且可实现实时仿真的仿真模型。美国国防采办大学认为,数字孪生是充分利用物理模型、传感器更新、运行历史、大数据、云端数据库等数据,集成多领域、多学科、多物理量、多尺度的动态仿真过程,

在虚拟空间中完成对物理实体的映射,从而反映物理实体的全生命周期过程。

根据目前国内外工业界和学术界对数字孪生技术的不同定义和阐释,本文提炼出了数字孪生技术的关键特性及技术,并对此展开了深入的研究。关键特性包括物理模型、虚拟模型、通信和数据模型。关键技术包括高精度高性能传感器及传感器网络。

根据数字孪生的不同定义,总结出数字孪生技术主要包含了3个关键特性:物理实体,虚拟模型、连接和数据。3种关键特性之间的关系即物理实体通过规定的数字模型建立起与虚拟模型相对应的连接。

1.1 物理实体

物理实体是存在于现实物理空间内的客观物体,其属性包含了几何模型、基本物理学属性以及特定物理学属性。物理实体是实现数字孪生技术的第一步,也是数字孪生技术的基础。物理实体在数字孪生技术中充当地基的作用,不仅为虚拟模型提供了可建模刻画的客观对象,也是各类高精度、高性能传感器反馈数据的动态来源^[6]。

根据陶飞团队^[7]对物理实体的基本分类和定义,本文扩展了物理实体各类别的具体表达及功能显形。物理实体按照功能和结构可以分为大致3类,如图3所示。

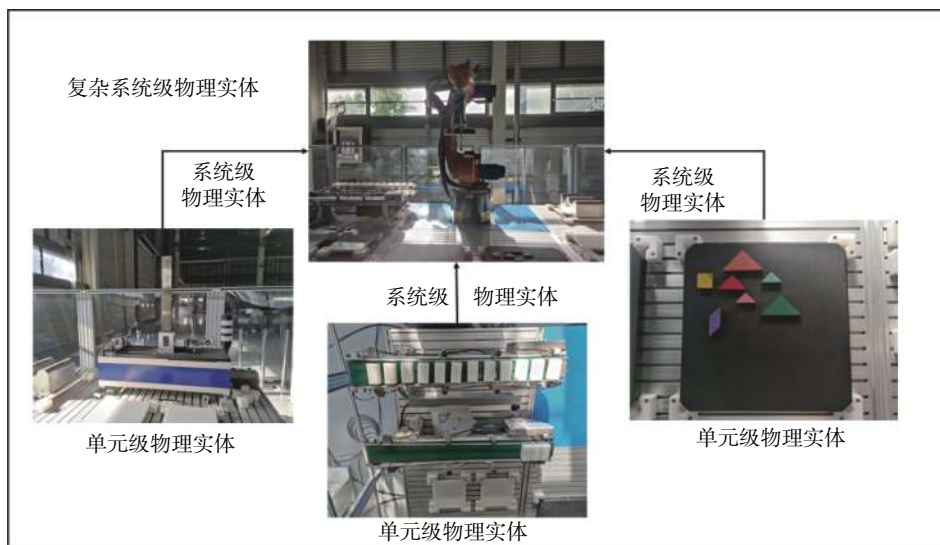


图3 物理实体分类

Fig. 3 Physical entity classification

(1) 单元级物理实体:单元级物理实体为功能实现的最小单位,既整个物理实体组成框架中不可再进行分割的个体。概念上,单元级物理实体包含了自身的几何模型、基本物理属性以及特定物理属

性。几何模型包括三维几何结构、材质、表面特征、微观材料结构等,基本物理属性包括质量、密度、材质等,特定物理属性按照需求的不同有不同的表现形式。以机械臂工作站为例,机械臂即视为一个

单元级物理实体,机械臂提供了自身的三维几何模型如每个旋转盘的半径、大小、厚度等,基本物理属性如机械臂的质量、材质、旋转盘最大可旋转角度、工件最大承重力范围等,特定物理属性如每个旋转盘的角速度、整个机械臂的拟合转动速度等。

(2) 系统级物理实体:系统级物理实体由单元级物理实体互相配置组合,并可以实现特定功能。系统级物理实体包含了所有单元级物理实体的几何模型及所有物理属性,并在此基础上孵化衍生出新的几何模型关系及耦合物理属性。系统级物理实体不仅仅是单元级物理实体的简单组成,而是对单元级物理实体的整体融合与优化。以机械臂工作站为例,机械臂工作站的一套流程功能如码垛搬运、七巧板拼装等即视为一个系统级物理实体,该系统级物理实体包括了所有相关单元级物理实体如机械臂、运输链、待运输模块等,每个单元级物理实体包含其自身的几何模型及物理属性并互相关联影响产生新的几何模型关系和物理属性。例如运输链自身属性包括材质结构、摩擦力系数、转动速度等,通过与机械臂组合产生了如逆向作用力承受度,最大重力承受范围等。

(3) 复杂系统级物理实体:复杂系统级物理实体由系统级物理实体组成,是能够实现各子系统之间组织、协调、管理等功能的综合复杂系统。复杂系统级物理实体包含了所有系统级物理实体的衍生几何模型、完整物理属性,并对系统级物理实体进行了相关的配置和调度。以机械臂工作站为例,完整的机械臂工作站就是一个复杂系统级物理系统,其中包含了几个系统级物理实体如码垛搬运、注塑、七巧板拼装等,机械臂工作站将这些独立的功能整合和连接,并构建框架来实现对各个功能的分配和调度管理。

1.2 虚拟模型

虚拟模型是将物理实体从多维度、多时间尺度、多方面进行刻画和建模,并能够体现物理实体的几何模型、物理属性、约束和行为准则等^[8]。数字孪生技术中的虚拟模型本质是物理实体在计算中的一种真实映射,如图4所示^[9]。虚拟模型作为物理实体在计算机中的真实映射,时刻保持着和物理实体之间的联系,并根据物理实体的变化相应的做出对应的变化。虚拟模型应该遵守以下法则:

(1) 基于物理实体的真实模型

虚拟模型的刻画和建模必须完全按照物理实体来进行,包括几何特征、物理属性等。虚拟模型作为物理实体的孪生体,从本质上来解释既是将物

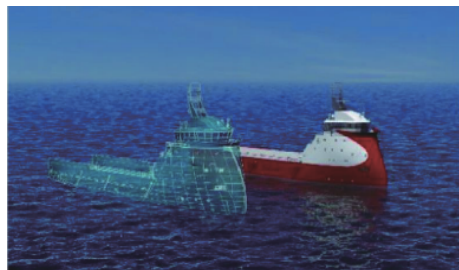


图4 1种船舶数字孪生虚拟模型^[9]

Fig. 4 A virtual model of ship digital twin^[9]

理实体模型以及附带的物理规则按照一定规则映射到了计算机中,所以虚拟模型的构建必须完全参照物理实体模型,并且需要体现系统级物理实体中各单元级物理实体之间的连接关系以及复杂系统物理实体中各系统级物理实体之间的耦合关系。

(2) 物理实体的忠实映射

虚拟模型作为物理实体的忠实映射,必须拥有和物理实体交互连接和同步更新的功能。在虚实互控操作中,这一点尤其显得重要,无论是虚控实还是实控虚,都要求虚拟模型能够实时与物理实体保持同步。例如在数字孪生城市中,通过对城市中的物理实体和虚拟模型之间搭建高速的连接和同步,使现实城市中每当建筑物倒塌、火灾现场、车祸现场等突发情况发生时,虚拟模型会及时接收到这些实体发生的变化,并随之产生变化,反之亦然,虚拟城市中的虚拟模型运行状态发生改变时,真实城市也会进行同步更新,将虚拟城市中对应的变化以实体化的方式展现出来。

1.3 连接和数据

连接方式和数据是数字孪生过程中非常重要的一环,架构起了物理实体和虚拟模型之间的桥梁并产生数据流。物理实体、虚拟模型、数据和连接这3个特性贯穿了整个数字孪生的全部生命周期,但是数据和连接与物理实体、虚拟模型不同的是数据和连接依托于物理实体和虚拟模型而存在^[10]。数据根据数字孪生虚实交互的交互方向不同,可以分为2类交互数据类型:①实控虚数据:实控虚数据由各类传感器采集来的多源异构模拟信号转换而成,即是物理实体的各属性、指标、参数变化传送到计算机中进行统一的监控和管理。②虚控实数据:虚控实数据由计算机下达指令并传递给虚拟模型,当虚拟模型运行上位机下达的相关指令时,将上位机传达的指令进行编码和转换并反馈给物理实体,物理实体根据这些进行特殊编码的数据同步跟随虚拟模型完成指令。数据如果是物理实体和虚拟模型桥梁上的信号流的话,那么连接就是架

构起物理实体和虚拟模型的桥梁。

连接的含义非常的广,包括了物理实体之间的连接、各传感器之间的连接、物理实体和虚拟模型之间的连接等。数据依托于连接存在,而连接依托于物理实体和虚拟模型而存在。根据连接的对象不同,连接可大致分为 2 类:①物理实体之间的连接:物理实体之间的连接包括单元级物理实体之间的连接,系统级物理实体之间的连接。根据需求不同,具体的连接规则也不尽相同,但是由于大多数物理实体之间的距离不会超过太远,所以物理实体之间的连接通常采取有线连接,因此物理实体之间的连接相对较稳定和快速。②物理实体和虚拟模型之间的连接:物理实体和虚拟模型之间的相对位置较远,通常采用无线的连接方式。无线连接大

大的延展了连接的距离,但是受限于其自身的技术条件,无线连接的方式会直接导致物理模型和虚拟模型之间的连接速度较慢、稳定性不高。

2 数字孪生的关键技术特征

2.1 高精度、高性能传感器及传感器网络

传感器作为物理实体的“眼睛”以及“皮肤”负责精准并快速地收集物理实体的相关物理参数、属性、状态以及物理实体所处环境中的各种相关因素。传感器对整个数字孪生交互系统起到了非常关键的作用,数字孪生系统的虚实交互过程的基础就是各类传感器反馈数据的准确性、实时性以及协调性^[8],如图 5 所示。

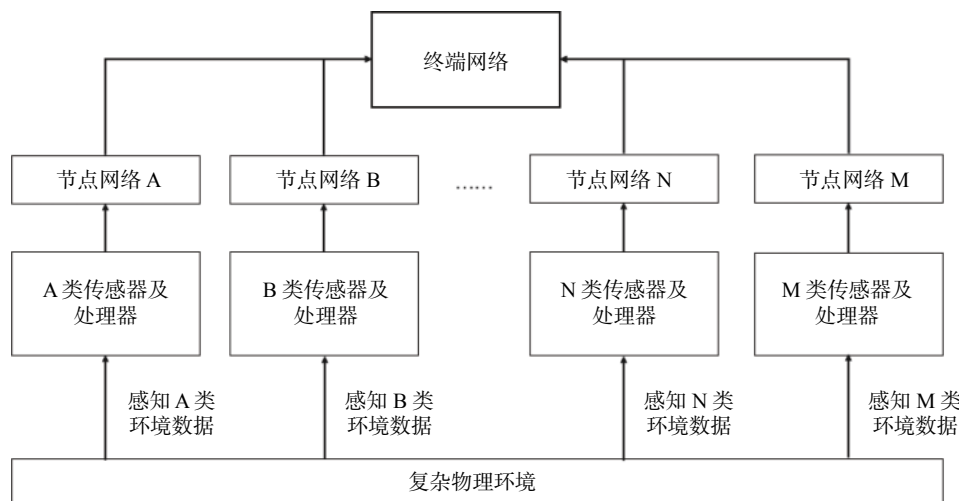


图 5 分布式传感器网络

Fig. 5 Distributed sensor network

2.1.1 准确性

传感器的准确性要求对于数字孪生而言是最重要的性质。传感器能够返回的数据精确度越高,数字孪生系统的仿真性就越强、仿真状态越精准、仿真效果越卓越^[8]。对于传感器本身而言,传感器必须具备非常强的抗干扰能力和精准采集能力,对于各种类型的波动模拟信号能够进行稳定、精准的采集并进行一定的处理。例如在工业机械臂领域,位移传感器的精度对于机械臂的重要性不言而喻,对于一些精密产品的制造如芯片等,毫米级别甚至微米级别的差别就可能导致整个制造流程崩溃,因此传感器的准确性对于整个数字孪生交互系统都起着非常大的作用。

目前,传感器的采集目标主要为采集模拟信号输入再按照固定标准转换为相对应的电信号输入。模拟量多为渐变的模拟信号,如温度、压力、湿度、

成分等,是自然界真实存在的。模拟信号的变化往往难以捉摸,根据自然界或者物体的状况发生改变,而传感器则需要对模拟量的变化非常敏感。在分布式网络中,传感器节点数量非常庞大,其中每一个传感器的误差控制即使控制在百分之一,进行相关数据融合之后,精确度也会丢失很多,从而产生一系列的“蝴蝶”效应^[11]。所以,这就对传感器的准确性非常高的要求。目前很多传感器受限于技术问题,无法十分精准的采集到需要采集的模拟量,这也是当前传感器技术的痛点所在。

2.1.2 实时性

数字孪生的虚实交互的过程是多维度、多时间尺度的耦合关系,且以虚控实为最终目的。数据的实时更新和动态处理是数字孪生过程的命脉之一。例如,数字孪生系统生命周期中的运行时间过程中,数据用来反馈物理实体的各种真实状态,并进行优

化和反馈,如果数据的实时性很差,将会导致整个运行时间过程同步率差、容错率非常高、数据偏差等问题。其次,数字孪生中的数据都是由自身产生,不具有先验知识,对更新迭代有很高的要求。

实时性可以保证最后数字孪生形成一个自我优化、自我反馈的闭环。实时性同样要求传感器数据传输速率需要达到一个极高的标准,如果产生网络延迟等问题,将会大大的影响传感器的实时性。这也是目前数字孪生技术中传感器网络的一个技术难点,数字孪生系统中普遍存在大量传感器节点,以目前的无线传输速度很难满足如此庞大的无线传感器网络。在未来,5G时代下的强大速度完全可以承担数字孪生技术中的高速率传输,可以装配更多传感器,实时收集更多、更广、更细的数据。

2.1.3 协调性

多源传感器之间的格式编码基本都不同。不同的数据编码格式在互相融合的过程中会产生不可避免的误差。所以采用易融合性高的编码格式可以有效的减少在融合处理数据方面产生的误差^[12]。

目前的传感器网络主要是分布式传感器网络,分布式传感器网络可以通过在分布式网络中插入传感器来节点来获取环境中个物理属性的当前状态,但是分布式传感器网络的缺点十分的明显,分布式传感器网络会造成大量的数据通信,并且不同的传感器接入同一个网段,数据之间的通信格式必然会形成一个新的问题。对于这个问题,国外已有学者研究了一种新型的传感器网络。本文首先提出了一种新的范式数字双网络(digital twins network, DTN)来建立网络拓扑结构和任务随机到达模型。该方法可以完全解决在分布式网络中存在的问题。

2.2 多源异构数据处理及连接方式

对于数字孪生中的数据模型及连接方式,主要问题存在于以下4个方面:①多源异构数据之间的协调同步;②数据传输的安全性和隐私性;③数据传输的可靠性;④低功耗的数据传输^[6]。

多源异构数据之间的协调同步是现在数字孪生技术面对的一个主要问题,也是当今大数据时代普遍面临的一个重大难题之一。解决多源异构数据之间的协调同步的关键是需要一种模型或算法对多源异构数据进行匹配、融合和处理。目前,普遍采用3V(海量、高速、类型多样)特性下的集成技术,该集成技术包括模式/本体对齐、实体链接、冲突解决和关系推演。但基于3V特性下的集成技术存在一定的技术局限性,导致多源异构数据之间

的协调同步仍存在固定偏差。未来在大数据技术的快速发展下,多源异构数据之间的融合将会有更好的表现形式^[13]。

无线传输是数字孪生技术中最常用的传输方式,无线传输的远距离、低成本、低功耗都给数字孪生技术带来很大的便利,但无线传输受限于其自身的传输方式,相较有线传输,可靠性和安全性都存在一定的隐患。如使用无线网络的形式对数据进行传输,则必须考虑到数据在传输过程中因为各种可能丢包、甚至被恶意非法篡改的可能性,因此无线传输通常采用一种特殊加密的通信协议来确保目标能够收到发出端发出的完整、可靠、安全的信息。目前,无线网络技术逐步向5G时代发展,5G技术将提供超高速、高可靠性、低能耗、高安全性的通信和数据传输,5G技术的发展必定会为数字孪生技术的通信连接提供有力的帮助。此外,区块链技术和微云技术作为补充工具,也将进一步增强数据之间的智能连接^[14]。

陶飞等^[4, 7, 15-16]对于数字孪生产生的多源异构数据和连接方式提出了一种规则来约束。陶飞团队在6个方面对数据进行规范,分别为数据表示标准、数据分类标准、数据存储标准、数据预处理标准、数据使用与维护标准、数据测试标准。而对连接进行了4个方面的规范,分别是连接映射标准、信息传输标准、交互与集成标准、连接测试标准。总共十种关于数据与连接的规范标准可以很大程度上帮助解决以上存在的问题。

2.3 高保真虚拟建模及动态仿真

高保真性的虚拟建模技术是数字孪生的“灵魂”所在,而动态仿真则反映了数字孪生是跨越产品全生命周期的动态过程。数字孪生的高保真虚拟建模及动态仿真为了能够在计算机中尽可能的还原物理实体的各种几何规则、物理学属性。对于高保真虚拟建模及动态仿真来说,首先高保真虚拟建模需要多领域、多维度、多时间尺度、高精度的模型数据融合,其次对于动态仿真需要能够实时监控仿真过程并获取反馈的数据、完成自我更新和优化。

目前,虚拟仿真被用于生命周期的不同阶段,由不同的工程学科、不同类型的终端用户在不同的基础设施结合不同的仿真领域和工程方法在各种不同的应用领域。工程师通常使用面向块的仿真系统来开发控制器或使用有限元分析工具来测试和验证组件布局,这样的建模和仿真方式仅刻画复原了数字孪生生命周期内的一个特定过程^[17]。而在整个数字孪生周期内,单一维度单一尺度过程的

建模方式会导致当特定过程的仿真数据在整个数字孪生生命周期过程发生变动时,会对使用不同方式进行平行虚拟建模的模拟系统造成不连续、耗时、精确度下降的问题。

例如,对于工业机器人的仿真方法通常基于运动学和刚体动力学原理。工业机器人的仿真有非常多的模拟软件可用,一些已知的和当前使用的仿真软件工具 ROBCAD, V-RE、Demo3D 等^[18]。这些模拟工具的应用为规划和优化机器人工厂、传感器、装配系统等提供了高效和灵活的可能性。但是,几乎所有这些系统的缺点都是缺乏灵活性,因为它们只是为一个非常特定的应用领域开发的。数字孪生是一个全生命周期的过程,对于特定领域的建模方式往往在数字孪生技术的配置方面是很复杂且极容易出错的^[19]。就目前来说,还缺少一种整体的、融合性的虚拟仿真技术可以在数字孪生的整个生命周期内发挥作用。

所以,为了克服当前以工具为中心的方法的这些局限性,有必要开发新的概念,使仿真技术的用户能够在不同的维度上灵活地结合和交换不同的方面。就一个维度而言,必须能够组合这个维度的

不同方面,并在各个方面之间轻松地进行更改。对多个维度而言,我们必须能够整合来自各个维度的各个方面。在未来数字时代的建模与仿真可以与真实世界建立永久、实时、交互链接,建模与仿真不再是离线的、独立的、特定阶段的存在,而是向在线化、泛在化、常态化的服务发展^[20]。

3 数字孪生在智能制造领域中的应用

数字孪生技术作为工业领域的新一代代表性技术,具体在以下几个领域都有很广泛的应用,如制造车间、航空设备、军工设备、智慧医疗、智慧城市、复杂装备制造等领域^[15]。

3.1 数字孪生在车间制造领域中的应用

以制造车间为例,制造业最基本的单元就是制造车间,数字化和智能化对于实现车间的智能制造是非常迫切的。将数字孪生技术应用在制造车间从而形成新的体系结构——数字孪生车间。数字孪生车间的全生命周期主要体现在以下 4 个阶段,分别是产品设计阶段、产品生产阶段、产品运行阶段、产品维护阶段,如图 6 所示^[21]。



图 6 数字孪生车间在各生命周期阶段

Fig. 6 Digital twin workshops at various life cycle stages

3.1.1 数字孪生车间在产品设计阶段

由于车间制造的产品本身不具备任何先验知识,是一个从无到有的自主变化过程^[21]。因此,通过数字孪生技术对车间生产产品进行建模,然后通过观察产品的虚拟模型在仿真环境下一定时间内的各项变化来预测和评估真实产品在未来时间范围内的各种可能性^[22]。

数字孪生技术可以对车间的需求进行快速地

配置并且建立相对应的数字孪生虚拟模型,借助大数据分析和历史数据,在产品研发初期就可以迅速的确定产品需要使用的组件配置,并拟合得到成品的雏形^[23]。在建立了相对应的数字孪生虚拟模型之后,通过将虚拟模型放入高度还原的虚拟仿真环境中进行测试,可以得到虚拟模型在仿真环境中的运行轨迹,并通过多次重复的仿真获得多组运行轨迹数据,对数据进行整合和处理,可以得到真实产

品在真实环境下的运行轨迹。

产品设计阶段对车间生产产品的虚拟模型进行了虚拟运行轨迹的判断,保证了真实产品的有效性和可用性,并极大程度的为之后的生产过程简化了时间和人力成本^[24]。

3.1.2 数字孪生车间在产品生产阶段。

对于普通工厂而言,车间流水线的人机交互性较差,在监控和管理之间存在一定的时间差,并且极度依赖人力成本。而数字孪生车间可以极大程度的提升车间的人机交互性,减少人力成本资源,并可对物理车间进行仿真来构建一个与物理车间相互映射的虚拟车间。虚拟车间实时同步、更新物理车间的最近状态,并通过上位机平台对虚拟车间进行实时监控、指令下达、生产调度、生产管理、安全报警等指令^[25]。

数字孪生车间通过对生产线的零件、生产方式进行生产调度管理,根据在设计阶段成形的数据,精准的完成生产零件的配置和运用,并对流水线执行时间分配管理、柔性调度管理等优化算法,最大程度的提升了车间流水线的生产能力和生产时间饱和度^[26]。

数字孪生车间不仅可以对生产线进行了生产调度管理、流水线性能优化,还可以对整个生产过程进行实时监控、人为介入管理、安全报警等。通过虚拟模型,可以使管理员在任何有网络信号的地方对生产线进行实时监控,一旦发现异常,数字孪生系统会自动触发安全性能报警功能^[27]。而在生产过程中存在的许多生产变换性,数字孪生车间允许管理员进行干预管理和操作,实时对生产过程进行调控和控制^[28]。

3.1.3 数字孪生车间在产品运行阶段

普通车间通常缺乏对产品运行状态的监控和评估,以至于产品在运行过程中长时间处于观测盲区,极大缩短了产品的真实运行生命周期^[29]。

因此,数字孪生车间来对车间生产产品进行了有效监控,利用分布式传感器网络中的各传感器节点对运行过程、运行状态进行实时监控、管理和调整,不间断记录产品运行期间产生的运行数据,并反馈数据到虚拟模型中,再通过计算机对数据进行反馈和处理,最终将大量的运行数据整理为运行历史记录存储在云服务器中^[29]。

海量的运行历史数据为数字孪生车间做出决策提供了基本保障,并且通过运行历史数据的不断迭代更新,数字孪生系统可以不断优化和完善之前的设计过程,提升设计过程的速度和精准度,最终

完成自我优化、自我更新^[30]。

3.1.4 数字孪生车间在产品维护阶段

普通车间通常缺乏对产品故障、损坏的判断标准,主要依靠人为经验来对产品进行故障检测和判断^[31]。因此通过数字孪生车间可以用来对车间产品进行维护、健康管理、报废处理等,数字孪生车间通过对产品搭载大量的传感器来获得产品的零件磨损、疲劳、故障、损坏等情况并实时反馈数据至虚拟模型,虚拟模型根据反馈数据以及大量的历史数据进行大数据计算,对产品作出健康管理以及对产品可能产生的磨损、报废情况进行预估^[32]。

当产品出现磨损、故障、损坏等情况时,数字孪生技术可以实时捕捉问题位置,问题情况,并根据大数据运算给出损坏、报废的具体情况和说明。利用维护阶段的历史数据,数字孪生车间可以在车间生产阶段对一些高风险部位进行修正和更改,并对高风险部位增加安全性能检测和管理,减少损坏和磨损出现的可能性,增加产品的使用时间,最终形成数字孪生车间的闭环管理^[33]。

3.2 数字孪生在其他领域的应用

数字孪生技术在其他领域包括航空设备、军工设备、船舶制造、文化遗产、复杂装备制造、智慧医疗、智慧城市等方面也有很好的应用。例如,在物质文化遗产建设中数字孪生技术可以帮助构建“数字孪生物质文化遗产系统”,建立物质文化遗产数字化,帮助保护、传承、开发物质文化遗产^[34];在船舶制造方面,数字孪生技术可以帮助构建全生命周期的“船舶数字孪生系统”,开展基于数字孪生船舶的生命周期一体化管理;在复杂装备方面,数字孪生技术可以对整个复杂系统进行运行监控、状态检测等,从而提高复杂装备的使用寿命;在智慧医疗方面,数字孪生可以帮助医疗领域建设“医疗数字孪生系统”以及帮助个人建立“医疗数字孪生个体”^[35];在智慧城市方面,互联网企业龙头公司使用数字孪生技术帮助当地政府规划、管理城市,如阿里巴巴集团与杭州市政府合作,运用阿里巴巴的数字孪生技术来实现杭州市的城市管理;腾讯集团与云南省文旅厅合作,通过“一部手机游云南”项目,将云南旅游的各方各面结合在一起。

4 结 语

数字孪生作为一门集合了多学科,多领域的综合技术目前发展还未成熟,尚缺一些重要的关键技术,并且在国内的应用还不多,但是可以肯定的是数字孪生技术有非常好的前景性。首先数字孪生

的出现给了推动产业智能化一个明确的方向,其次数字孪生技术的应用宽泛性非常的大,小至一条车间流水线,大至整个城市都可以运用数字孪生技术,最后数字孪生技术的高集成、高融合性保证了他能够在未来长时间内生存和发展。

数字孪生技术目前在很大层面上受限于当前的技术水平,但我们不妨畅想一下未来,数字孪生技术可以和许多相关技术互相配合。例如,数字孪生技术搭配 5G 的超高速通信可以使数字孪生的应用层面扩大到所有可以想象到的方面,并且 5G 的超高速互联给了数字孪生中分布式传感器更多的传感器空间,更多的传感器就意味着数字孪生系统对环境的收集能力变得更广泛、更精准;而数字孪生搭配 VR 虚拟现实技术可以使用户从视觉、听觉、触觉等各个方面提供沉浸式的虚拟现实体验,实现实时连续的人机互动;数字孪生技术也可以配合 3D 打印技术来完成物理实体的创建过程,当数字孪生系统建立了虚拟模型之后,通过 3D 打印技术可以尽可能的还原数字孪生所建立的虚拟模型。

总之,数字孪生技术的发展呈现一个可预期的上升趋势,作为工业 4.0 时代下最闪耀的新星,相信数字孪生技术在未来的发展会越来越好。

参考文献:

- [1] 刘青,刘滨,王冠,等.数字孪生的模型、问题与进展研究[J].河北科技大学学报,2019,40(1):68-78.
- [2] 刘大同,郭凯,王本宽,等.数字孪生技术综述与展望[J].仪器仪表学报,2018,39(11):1-10.
- [3] GRIEVES M. Origins of the digital twin concept[DB/OL]. [2016-8-5]. https://www.reschgate.net/pblication/307509727_Orins_of_the_Dital_Twin_Concept.
- [4] 陶飞,戚庆林,王力羣,等.数字孪生与信息物理系统——比较与联系[J].Engineering,2019,5(4):132-149.
- [5] 周瑜,刘春成.雄安新区建设数字孪生城市的逻辑与创新[J].城市发展研究,2018,25(10):60-67.
- [6] 于勇,范胜廷,彭关伟,等.数字孪生模型在产品构型管理中应用探讨[J].航空制造技术,2017,7:41-45.
- [7] 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] 杨林瑶,陈思远,王晓,等.数字孪生与平行系统:发展现状、对比及展望[J].自动化学报,2019,45(11):2001-2031.
- [9] 景乾峰,神和龙,尹勇.一种基于虚拟现实系统的船舶数字孪生框架[J].北京交通大学学报,2020,44(5):117-124.
- [10] 李仁旺,肖人彬.数字孪生驱动的大数据制造服务模式[J].科技导报,2020,38(14):116-125.
- [11] 李建中,李金宝,石胜飞.传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展[J].软件学报,2003,10:1717-1727.
- [12] 屈挺,张凯,罗浩,等.物联网驱动的“生产-物流”动态联动机制、系统及案例[J].机械工程学报,2015,51(20):36-44.
- [13] 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.
- [14] 陶飞,程颖,程江峰,等.数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J].计算机集成制造系统,2017,23(8):1603-1611.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 卢鹄,韩爽,范玉青.基于模型的数字化定义技术[J].航空制造技术,2008,3:78-81.
- [18] 吴义忠,刘敏,陈立平.多领域物理系统混合建模平台开发[J].计算机辅助设计与图形学学报,2006,1:120-124.
- [19] 刘清华,熊体凡,万立,等.产品生命周期管理的访问控制模型研究[J].计算机辅助设计与图形学学报,2005,9:2116-2122.
- [20] 王建民.工业大数据技术综述[J].大数据,2017,3(6):3-14.
- [21] 胡晶.工业互联网、工业4.0和“两化”深度融合的比较研究[J].学术交流,2015,1:151-158.
- [22] 王鹏,杨妹,祝建成,等.面向数字孪生的动态数据驱动建模与仿真方法[J].系统工程与电子技术,2020,42(12):2779-2786.
- [23] 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.
- [24] 刘婷,张建超,刘魁.基于数字孪生的航空发动机全生命周期管理[J].航空动力,2018,1:52-56.
- [25] 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.
- [26] 陶剑,戴永长,魏冉.基于数字线索和数字孪生的生产生命周期研究[J].航空制造技术,2017,21:26-31.
- [27] 周兴泽,刘松,孙浩,等.基于数字孪生的物联网工业运维系统[J].工业控制计算机,2022,35(5):115-118.

(下转第 188 页)