

面向制造企业全生命周期的数字孪生研究综述

庄晨怡

浙江理工大学, 浙江 杭州
Email: 594208284@qq.com

收稿日期: 2021年5月10日; 录用日期: 2021年6月17日; 发布日期: 2021年6月24日

摘 要

随着“工业4.0”“智能制造”等概念规划的提出以及大数据、人工智能等高新技术的普及,工业领域制造行业呈现高度信息化、自动化趋势,生产过程和生产模式逐步智能化、一体化。传统生产模式下通过实际生产过程获得的数据进行指标测量并制定决策的方式已经不再能够满足当下制造企业对多单元复杂生产系统的管控需要,因此,面向制造企业全生命周期的数字孪生成为制造企业转型升级的新突破点、成为智能制造领域的新兴研究热点。本文通过与传统仿真技术进行横向对比,系统分析基于大数据、人工智能、虚拟现实等的数字孪生技术内涵以及其与传统仿真技术存在的关联和异同,重点分析面向制造企业全生命周期、针对制造企业多单元复杂生产系统智能运行和维护的数字孪生的优势和具体应用方式,阐述数字孪生对实现制造企业全生命周期管理的可行性,并展望其未来的发展趋势和方向。

关键词

数字孪生, 全生命周期, 智能制造, 虚拟现实, 大数据

A Review of Digital Twinning for the Whole Life Cycle of Manufacturing Enterprises

Chenyi Zhuang

School of Information, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang
Email: 594208284@qq.com

Received: May 10th, 2021; accepted: Jun. 17th, 2021; published: Jun. 24th, 2021

Abstract

With the introduction of concept planning such as Industry 4.0 and Intelligent Manufacturing, at the same time, the popularization of high and new technologies such as big data and artificial intelligence, the manufacturing industry in the industrial field presents a high degree of informatization

and automation trend; the production process and production mode are gradually intelligent and integrated. Under the traditional production mode, the index measurement and decision making method based on the data obtained from the actual production process can no longer meet the current manufacturing enterprises' control needs for the multi-unit complex production system; therefore, digital twinning oriented to the whole life cycle of manufacturing enterprises has become a new breakthrough point for the transformation and upgrading of manufacturing enterprises and an emerging research hotspot in the field of intelligent manufacturing. This paper makes a horizontal comparison with the traditional simulation technology, systematically analyzes the connotation of digital twin technology based on big data, artificial intelligence and virtual reality, as well as its correlation, similarities and differences with traditional simulation technology. The analysis focuses on the whole life cycle of manufacturing enterprises, aims at the advantages and specific application of digital twin for intelligent operation and maintenance of complex multi-unit production system, expounds the feasibility of digital twinning to realize the whole life cycle management of manufacturing enterprises, and looks forward to its future development trend and direction.

Keywords

Digital Twinning, Full Lifecycle, Intelligent Manufacturing, Virtual Reality, Big Data

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前, 工业生产正面临产能过剩、供需矛盾、成本上升等诸多问题, 传统的研发设计、生产制造、应用服务、经营管理等方式已经不能满足广大用户新的消费需求。制造过程决策优化控制往往存在多维、多时空尺度、复杂耦合关联等特点, 决策优化过程较为复杂, 因此, 复杂工业制造过程智能决策、协同优化是一个极具挑战的问题。目前, 数字技术、人工智能技术已经成为工业制造业领域发展的主要技术, 智能化技术已经被广泛应用于工业生产设备甚至是整个生产系统中。其中, 通过数字孪生技术在数字产品与物理车间之间建立联系, 对传统工业生产模式进行优化, 是实现工业制造业企业深刻智能化转型升级的重要突破口之一。企业借助数字孪生技术能够以数字驱动角度重新审视自身企业生产模式中的缺陷, 并对此进行改进创新。同时, 数字孪生技术不仅能够运用于生产环节, 更能够覆盖整个企业的全生命周期, 为企业的生产各阶段提供新思路和新方法。针对上述数字孪生技术在制造业企业全生命周期中的优势, 本文着重探讨数字孪生技术与传统仿真技术的关联和差异, 分析面向企业全生命周期的数字孪生关键应用和方法。

2. 传统仿真与数字孪生

2.1. 传统仿真技术概述

随着 CAD 系统在工业领域应用的普及、现代设计问题的复杂化, 以及计算机图形学、人工智能等基础技术的发展, 三维建模技术在市场需求的推动下应运而生。早期制造企业普遍采用三维建模技术, 通过采集现实物体或场景的三维数据的方式, 在计算机中以虚拟模型的形式还原现实物体或场景, 从三维视角展开分析和评价方案的可行性及未来产品的质量 and 可靠性。这种技术通过建模软件对车间厂房、各

类机床、物流设备、传送装置等车间模型进行三维建模，同时按照真实车间的情况对模型进行布局，能够较为真实地反应现实车间的情况[1] [2]。

由于计算机技术的快速发展和社会的不断进步，简单的三维建模技术已经很难满足制造企业的设计需要。在这一背景前提下出现的虚拟现实建模就是结合了虚拟现实技术与三维建模技术的、为适应不断发展的社会需要而出现的仿真技术。它是一种使用计算机开发的、基于现实基础的、融合多种信息源的、具备交互功能的三维动态场景和虚拟现实行为的技术。通过虚拟现实建模实现的虚拟制造能够以数字化形式对实际制造过程进行无差别实现，其动态仿真的结果能够为实际生产制造系统提供接近实际的数据信息，也能通过快速评估多种制造情况和工作效率、检查流程可靠度来达到优化生产过程资源配置、提高生产制造效率的目的[3]。

BIM (Building Information Modeling)同样是在三维建模技术基础上产生的一种技术。Chuck Eastman最早将 BIM 定义为：将建筑工程项目在全生命周期内的三维特征、结构信息和功能需求整合到一体化的模型之中，同时该整合模型还包含进度和施工过程的控制信息[4]。BIM的核心是通过建立虚拟三维模型，并利用数字化技术为模型提供完整的、与实际情况一致的、动态变化的建筑工程数据库，以提高信息集成化程度和协同工作效率。随着 BIM 在工程制造领域被广泛认可和应用，美国 McGraw-Hill 公司又对 BIM 的含义进行了如下的补充和阐述：BIM 通过建立一个系统的模型，实现对项目设计、建设和运营的数字化管理过程。同时它提出 BIM 模型应具备数字化、量化、全面化三方面的特征[5]。

2.2. 数字孪生概述

随着信息技术的不断发展、智能制造成为行业必然发展趋势的进程下，出现了依靠传统数字建模技术及仿真技术无法解决的制造新问题。数字孪生技术正是在该背景下出现的新技术。

数字孪生最早由美国国家航空航天局阿波罗计划中开发的两个完全相同的太空飞行器演变而来。NASA 首先在数字空间建立飞行器模型，并通过传感器实现与飞行器真实状态完全同步，通过监测与预测空间飞行器的飞行状态进行仿真分析，辅助地面控制人员做出正确决策。它是一种在物理实体的基础上，利用多种数字技术对物理实体对象的特征、行为和形成过程等进行描述和建模，同时采用实时感知、工业物联网、大数据分析等技术，在虚拟空间中映射形成数字虚体，并由信息平台构造虚实互应的数字化孪生体的一种技术。Grieves, Rosen, Vachalek 等学者的理论和实践研究提出，数字孪生既包括数字化的虚拟镜像，也包括物理的实体对象，以及虚拟和实体之间的双向真实映射与实时交互的信息连接和驱动关系。因此，它是一种整合了多属性、多维度、多应用可能性的仿真技术，具有高精度、高保真、多系统融合的特点[6] [7] [8]。

在工业制造领域，它的主要应用方式为：通过物理世界中的传感器获取物体和环境的信号，借助各种技术集成手段，实现信息世界与现实世界的数据传输及信息空间与物理空间的数据融合，使用人工智能、机器学习及大数据分析等方法，建立物理实体与流程的数字化分析模型，最终利用驱动器下达指令，开展生产运营活动。

2.3. 传统仿真技术与数字孪生的对比

数字孪生与三维建模技术虽然同属于仿真技术，但前者通常更关注建模场景的保真度，要求准确表现物理对象的特性和状态，而后者虽然也需要依靠建模，但它更关注动态中的变化关系。具体来说，数字孪生需要数字主线以实现数字对象与信息对象之间的上下行数据交互。

VR (虚拟现实)与 AR (增强现实)的不足之处在于它们对数据的处理都是单向的，即只允许用户沉浸在虚拟世界中，但不能因某些需要的出现而发生及时调整与改变。而数字孪生处理能够实时、准时创建

与物理实体等价的“克隆体”外，更重要的是能够对数据进行仿真分析，为物理实体的后续运行提供优化方案，同时能够辐射到生产过程的全生命周期。因此，数字孪生的核心特征是双向性，即本体向孪生体输出数据、孪生体需要本体作为建模依据，同时孪生体能向本体反馈信息并输出优解。在 VR 和 AR 的基础上，数字孪生更需要大数据、传感器、物联网以及 AI 等技术的支持[7] [9]。

BIM 是现代工业、建筑业领域普遍采用的技术，它的作用范围同样是项目全生命周期，也是通过数据输入、提取、更新和维护来进行协同作业的一种高新技术[10]。而在 BIM 之后的数字孪生的特点在于“现实、真实、精确”，可以说比 BIM 更加智慧。Bentley 首席通讯官 Chris Barron [11]表示，数字孪生集成了全生命运营周期不同节点传来的数据，可以为更多利益相关方提供针对性服务。另外，使用 BIM 模型往往需要原始的三维软件，而数字孪生能直接查询不同软件创建的 BIM 模型、直接对所有不同数据源的信息进行了解。

总的来说，数字孪生不是一门单一的技术，而是在计算机技术不断进步、适应市场发展需要的基础上产生的集大成技术，它是大数据分析、人工智能、虚拟现实等高新技术相结合的自然延伸。

3. 面向制造企业全生命周期的数字孪生

3.1. 领域现状与应用背景

由于技术限制，工业领域传统模式下的生产过程往往依赖于人的经验，需要车间生产人员耗费大量时间和精力进行生产线调试，导致效率低下且经济效益极低[12]。同时，市场需求正在从“满足功能”的基本需求向个体多样化、追求个性化的“满足差异化需求”的阶段过渡，相应的，制造企业的生产模式逐渐向大规模、小批量、多品种的定制化模式转变。因此，准备时间长、实施成本高、人员素质要求高的传统仿真技术在制造业存在便利性和灵活性限制[13]。其次，传统生产模式一般采用的数学建模方法是将生产线物理模型进行简化和抽象，存在一定假设性条件，使得模型与实际生产线的映射存在偏差，且基于原有生产线建立的数学模型无法吻合发生变化的生产线，只能通过建立基于新生产线的数学模型来重新进行调试，显然会造成极大的资源浪费[2] [14]。就我国制造企业来说，生产现场广泛存在情况复杂的问题，从而导致生产现场监管不及时、车间决策与生产环节的信息交互不全面、生产计划执行错位。面对制造业全球化提出的提高生产效率和反应速度、增强个性化和服务化程度、降低资源浪费和能源消耗等挑战，参与市场竞争的制造企业亟待转型升级。近年来，随着德国“工业 4.0”、美国“先进制造业国家战略规划”、英国“工业 2050 战略”等国家级工业发展战略先后被提出，不断有新的智能制造模式策略出现，典型的包括：云制造、信息物理融合(CPS)、数字孪生等。其中，具备动态分析优势的数字孪生技术能够对动态运行生产过程进行精准映射、在动态干扰下建立关联单元间的动态协同，使得工业领域高精度可控化生产变为现实[12]，是解决上述当前市场竞争下制造企业面临的转型问题、解决智能制造的信息物理融合难题的最佳技术，正在被越来越多的学者关注和重视。

数字孪生为当今制造模式向智能制造的转变提供巨大潜力，促使制造业设备的自诊断、自维护、自恢复成为现实[15]，能够解决当下传统仿真技术存在的信息集成融合不足、虚实交互不足、生产决策滞后等问题，通过构建复杂工业制造过程状态感知、实时分析、智能决策、协同优化的关键理论与技术体系，为制造企业带来了一种全新的技术框架，为技术驱动工业发展带来了突破性的价值，对智能制造的实现存在指向性意义。

3.2. 制造企业中的数字孪生

定制化需求下的生产过程存在随机性、动态性和低重复性的特点，导致生产过程受到的动态干扰因素较多[12]。由资源、流程等不确定因素引发的复杂动态生产环境意味着市场对制造企业的大型多单元生

产系统的整体运行和控制精度提出了更高的要求。

通过数字孪生,制造企业能够在不进行不确定性实地风险测试的状态下,使用数据建模实现全生产过程(从产品的设计,到产品的制造、以及产品的仓储与运输)的监控分析,并且整个实体生产过程都会在有备无患的状态下开展和启动。在生产制造环节,数字孪生不仅能及时测试、调整和检测实体物理设施的工作状况,发现产品的质量瑕疵、进行同步性修补与改善,更特异的功能是进行预测,即借助虚拟模型中生产线的等价映射镜像来提前优化生产过程中的资源与要素配置,捕捉、清除线上堵点,预测、排除要素搭配中的掣肘与障碍,发现、纠正生产过程中的失误与偏差,提前屏蔽制造过程中的不安因素,从而确保企业基础设施与生产能力在最优状态下递进,达到对整个生产过程的风险隔离与健康[6] [7] [9]。

通过数字孪生对实体世界生产制造进行虚拟映射以形成虚拟车间,需要结合车间人员、设备、物料等要素的静态模型数据以及动态运行数据。具体过程如下:首先通过物理对象感知,对实体世界物体和设备等多尺度、全要素信息进行实时感知、采集和融合,继而实现全过程的动态监控数字化感知环境;然后需要构建物理环境的多视图基本静态模型,并通过目标级联、参数耦合、约束关联等方式对生产计划、运输计划和存储计划指定初始的运作计划;完成静态建模后,以驱动事件和变迁时间为基础进行实时动态仿真,构建实时动态模型完成虚拟模型层对系统底层物理环境的实时运作情况的镜像映射,同时基于实时生产数据和历史生产数据等孪生数据对全生产过程进行监控、仿真、评估和预测;最后针对上述数据进行整个制造企业的协调管控,实现决策的迭代优化调整。

3.3. 面向全生命周期的数字孪生

推动智能制造向纵深发展,不仅需要生产环节进行改革升级,而是应当从全局视角对企业的全生命周期进行管理,因此目前亟需支撑全生命周期活动智能决策优化的关键技术体系。

全生命周期管理是一种在产品全生命周期管理和服务全生命周期管理概念基础上发展的、源于社会需求的全新服务型制造发展理念和理论。近年来在技术革命冲击下的制造企业已经大大颠覆过去的传统生产模式,制造业的产业构成和生产全过程正在发生革命性的变化。同时由于产业互联网的发展,一体化进程促使制造企业不断向创新服务型制造企业转变,全生命周期管理正是为引导制造企业向服务型制造创新发展而产生的概念[16] [17] [18]。一般来说,制造企业的全生命周期可划分为设计环节、生产环节和服务环节。不同环节的管理目标和控制目标不同,且对整个生产系统的影响程度也大不相同[19]。制造企业应如何从各环节产生的海量数据中挖掘出有效信息、如何对庞大的有效信息进行数据处理、如何降低计算难度并提高企业生产效率、降低企业成本成为了当下制造企业全生命周期管理的关键难题。

集成物理世界与信息世界、融合多种高新技术的数字孪生已被证明是一种可行的办法[6]。数字孪生在制造领域的研究不应该仅仅局限于制造生产环节,而是应当运用全局思想,在对产品本身及其生产制造过程进行优化的同时,面向制造企业的全生命周期。制造企业使用数字孪生进行全生命周期管理,从产品设计、工艺流程设计的设计环节,到生产计划与排程、关键工艺与控制系统设定、质量管控等生产环节,再到供应链管理、运维服务的运营环节,在面向企业全生命周期的数字孪生技术中获取的数字主线贯穿制造企业多环节生产系统的全过程,是整体而非局部、集成而非孤立的,能够对整个多单元复杂生产系统进行监管、分析、预测,以达到实现企业全生命周期管理最优决策的目的。

面向制造企业全生命周期的数字孪生在理论建设指导方面为企业的生产各阶段提供新思路和新方法,在实际应用方面为制造企业的全生命周期各阶段提供具体的数字孪生工厂构建方法,从而促进经济运筹学、管理学与仿真技术、机器学习、大数据分析、物联网等高新技术的交叉融合,提高制造企业产品规划、生产控制、流程再造情境下的设计、生产、服务一体化程度。

4. 结语

制造型企业未来的发展方向,是通过高度自动化、数字化、可视化和集成化一体化来实现生产控制优化[20]。现在企业全生命周期管理普遍采用 BIM、工装编码或其它技术,基于数字孪生对制造企业全生命周期进行管理的方式还没有得到广泛应用。但从宏观发展趋势来看,在制造业向绿色制造、智能制造方向发展的战略要求下,以高度集成的方式对控制与工艺、设备与产线协同进行调试,不需要通过实际生产测试而是在虚拟环境中进行功能实现和代码验证,能够降低制造企业的生产风险、运营成本,优化管理、决策方案,延长企业价值链,高效率低成本实现制造企业全生命周期管理的数字孪生是必然的选择方向。

实体企业的应用案例有力佐证了数字孪生的重要价值:怀集登云汽配股份有限公司构建面向汽车气门生产全流程的制造物联网系统,实现将实现汽车发动机关键零部件制造从原材料到产品销售使用全生命周期的信息化监控与管理,大幅提高企业的信息化管理水平,人工大幅减少,实现运营成本降低 20%,生产制造效率提高 31.58%,产品研制周期缩短 30%,产品制造精度和稳定性显著提高,产品不良品率降低 10%。此外, Gartner 已连续四年将数字孪生列为十大战略科技发展趋势之一[21],可见数字孪生的价值之大。

在工业领域使用数字孪生对制造企业生产系统的单一环节进行管理存在的成本和技术门槛较低,因此已经得到一定程度的普及,但面向制造企业全生命周期的数字孪生仍然存在有待完善的部分。就国内而言,由于资金约束及工业设备的更新升级还未完成,数字孪生尚缺乏大规模运用的条件。此外,为防止制造企业面对新技术而无所适从或试错成本高昂的情况出现,有必要在国家层面制定数字孪生的相关标准,包括基础共性标准、关键技术标准、安全标准及行业应用标准等[7]。因此,尽管有关数字孪生的理论和研究应用基础已经完备,短时间内依然无法通过数字孪生实现制造企业全生命周期管理。

数字孪生涉及的其它关键技术,如传感器融合技术、寿命预测技术等,均与现实应用存在偏差,依然存在技术发展空间。因此,一边对制造企业进行转型升级,一边对理论研究进行探索和尝试,一边对技术框架进行优化和完善,应当是当前制造企业构建面向全生命周期的数字孪生体系的不错选择。

致 谢

感谢在整个论文写作过程中帮助过我的每一位老师和同学。首先,也是最主要感谢的是我的指导老师,在选题方面进行了深刻讨论,教导了我文献的查找方式、阅读技巧以及综述的写作方式与技巧。此外,老师在数字孪生、虚拟现实领域的知识储备十分丰富,在讨论过程中为我开阔思路,点拨了我很多。在论文写作方面,完成初稿后,老师认真查看我的文章,指出了我存在的很多问题,进一步帮助我加深对数字孪生和全生命周期管理的理解。在此十分感谢老师的细心指导,才能让我顺利完成文献查阅和综述撰写。其次,感谢在写作过程中给予我帮助的同学,帮忙查找了所需文献,在此也十分感谢他们的付出。

参考文献

- [1] 吴慧欣. 三维建模技术的研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
- [2] 刘康俊. 基于三维虚拟仿真的数字化车间建模优化研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [3] 张超波. 虚拟现实在制造系统设计中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [4] Edward Goldberg, H. (2004) The Building Information Model: Is BIM the Future for AEC Design? *CADalyst*, **21**, 56-58.
- [5] 闫锬. 基于 BIM 的工程项目全周期成本管理研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2015.

-
- [6] 卢阳光. 面向智能制造的数字孪生工厂构建方法与应用[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [7] 张悦. 数字孪生: 工业智能化的核心驱动[J]. 新理财, 2020(10): 32-34.
- [8] 王丰圆. 基于数字化双胞胎的三维可视化车间系统研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [9] 张政, 赵旭宇. 数字孪生驱动数字化转型与创新[J]. 通信企业管理, 2020(11): 56-58.
- [10] Committee NNBSP (2006) Overview Building Information Models. National Institute of Building Sciences.
- [11] 吴付标. BIM 之后, 数字孪生[EB/OL]. <https://www.cn bim.com/2019/0729/5413.html>, 2019-07-29.
- [12] 周达坚. 数字孪生框架下的工业园区“产-运-存”联动优化决策方法[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2019.
- [13] Section, I. (2017) Decomposition-Assisted Computational Technique Based on Surrogate Modeling for Real-Time Simulations. *Complexity*, **2017**, Article ID: 1686230. <https://doi.org/10.1155/2017/1686230>
- [14] 费永辉. 基于数字孪生的柔性作业车间动态调度研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
- [15] 陶永, 李秋实, 赵昱. 面向产品全生命周期的绿色制造策略[J]. 中国科技论坛, 2016(9): 58-64.
- [16] 黄群慧. 高度重视服务型制造创新发展[J]. 智慧中国, 2020(10): 42-44.
- [17] 吴俊. 服务型制造创新发展方向——全生命周期管理[N]. 中国经济时报, 2020-09-18(04).
- [18] 陶永, 王田苗, 李秋实, 赵昱. 基于“互联网+”的制造业全生命周期设计、制造、服务一体化[J]. 科技导报, 2016, 34(4): 45-49.
- [19] 段功玲. 全生命周期成本管理——从地铁项目角度[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉工程大学, 2017.
- [20] Li, J., Tao, F., Cheng, Y. and Zhao, L. (2015) Big Data in Product Lifecycle Management. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **81**, 667-684. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7151-x>
- [21] 黄海松, 陈启鹏, 李宜汀, 姚立国, 张松松. 数字孪生技术在智能制造中的发展与应用研究综述[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2020, 37(5): 1-8.