

机械行业数字孪生技术发展趋势分析

张 宁

广东机电职业技术学院先进制造技术学院, 广东 广州

收稿日期: 2024年8月28日; 录用日期: 2024年9月21日; 发布日期: 2024年9月29日

摘要

数字孪生技术作为新一代信息技术中的重要组成部分, 已经在多个领域展现了其巨大潜力和广泛应用。特别是在机械行业中, 数字孪生技术通过虚拟和现实的结合, 实现了对物理设备和流程的实时监测、模拟和优化, 从而提升了生产效率、降低了维护成本, 并促进了智能制造的发展。本论文对机械行业数字孪生技术进行概述, 探讨了该技术在机械行业中的应用现状和未来发展趋势。通过对机械行业数字孪生技术发展概述的系统分析, 本研究为行业相关方提供了有价值的见解和决策依据。

关键词

数字孪生技术, 机械行业, 发展趋势, 智能制造

Analysis of the Developing Trend of Digital Twin Technology in the Machinery Industry

Ning Zhang

School of Advanced Manufacturing Technology, Guangdong Mechanical & Electrical Polytechnic, Guangzhou
Guangdong

Received: Aug. 28th, 2024; accepted: Sep. 21st, 2024; published: Sep. 29th, 2024

Abstract

As an important part of the new generation of information technology, digital twin technology has shown its great potential and wide application in many fields. Especially in the machinery industry, digital twin technology realizes real-time monitoring, simulation and optimization of physical equipment and processing flow, through the combination of virtual and reality, thereby improving production efficiency, reducing maintenance costs, and promoting the development of intelligent manufacturing. This paper summarizes the digital twin technology in the mechanical industry, and discusses the application status and future development trend of the technology in the mechanical

industry. Through the systematic analysis of the development of digital twin technology in the machinery industry, this study provides valuable insights and a basis for decision-making for interested parties in the machinery industry.

Keywords

Digital Twin Technology, Machinery Industry, Development Trend, Intelligent Manufacturing

Copyright © 2024 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

机械行业近年来发展迅速，在各个领域显示出巨大潜力，但在技术进步迅速、市场需求变化大的背景下，也面临诸多挑战。工业4.0、智能制造等成为带动机械行业转型的重要力量，使得机械行业必须顺应这一变革，向数字化、智能化方向转型。因此，能够促使机械行业数字化转型的数字孪生技术正成为机械行业瞩目的焦点[1]。通过对数字孪生技术的研究，可有效提升机械行业制造水平和市场竞争力，也为丰富数字孪生理论提供重要支撑。这一研究为促进中国制造业向数智化转型、向高品质发展献计出力，也为世界各国机械工业的技术进步再添新动力。

2. 机械行业数字孪生技术概述

数字孪生技术(Digital Twins)是一种建立物理世界和数字世界之间连接的创新技术，通过在虚拟环境中构建与物理实体相对应的模型来有效模拟、预测和控制现实世界。该技术一般由物理实体，虚拟模型和数据通讯3个部分构成。实体代表真实存在的特定物体或系统；虚拟模型则以数字形式展现，对实体各种属性、行为进行精确反映；数据通信是物理实体和虚拟模型之间信息交互反馈的桥梁，实现动态实时监控和虚拟模型表达。随着产业数字化加速，推动数字孪生技术在机械行业应用逐步深入。机械行业内相关设备在数字化建模和数据实时监控机制帮助下，效率和可靠性得到提升。数字孪生技术以其独特的虚拟与现实的映射能力，能够通过虚拟模型实时反映实际机械设备和系统各项状态，从而实现在性能、可靠性和效率上的全面监测与优化。该技术不仅推动了机械行业数字化转型，也为提升行业整体效率和降低运营成本创造了新的机会[2]。

同时，数字孪生技术也带来了一定的挑战。首先，数字孪生应用需要大量高质量数据以确保虚拟模型的准确性与可靠性，对于数据的高标准要求是实施数字孪生技术的关键，但是数据的获取、存储和处理依然存在种种难题。其次，从投入成本来看，数字孪生技术的实施需要投入大量数字化资源和信息化手段，这对不少企业而言压力不小。最后，针对机械行业的数字孪生技术的标准与规范尚未完全统一，企业在执行实施过程中可能会遇到兼容性问题。尽管如此，随着技术不断成熟和实施成本的逐渐降低，以数字孪生技术在设备设计、生产制造等方面的优势，预计数字孪生技术在机械制造领域会得到广泛应用，促进机械行业实现更高效、更智能的发展。

3. 机械行业数字孪生技术发展趋势与行业应用前景分析

在数字化技术迅猛发展的今天，机械行业应用数字孪生技术引发了广泛的关注。数字孪生技术实现了物理实体与虚拟模型的高度融合，并在机械行业相关的产品设计、生产制造等阶段提供了强大的技术

支持[3]。下面从技术演进、行业应用前景和未来发展等几个方面探讨数字孪生技术在机械行业的发展趋势。



Figure 1. The development level of digital twin technology

图 1. 数字孪生技术发展等级

首先，从技术演进的角度来看，最初数字孪生技术的研发以建模和模拟为主，研究人员通过建立虚拟模型对实际场景进行模拟，将物理实体状态和变化过程通过虚拟模型复现出来；但随着物联网、大数据等信息化技术逐步成熟，数字孪生技术呈现智能化、精准化、实时化等趋势，虚拟与现实能够实时同步运行、协同发展，并精准预测未来数据和优化实体状态。**图 1** 为根据艾瑞咨询总结的数字孪生技术发展的 5 个等级，级别越高，数字孪生技术越强。

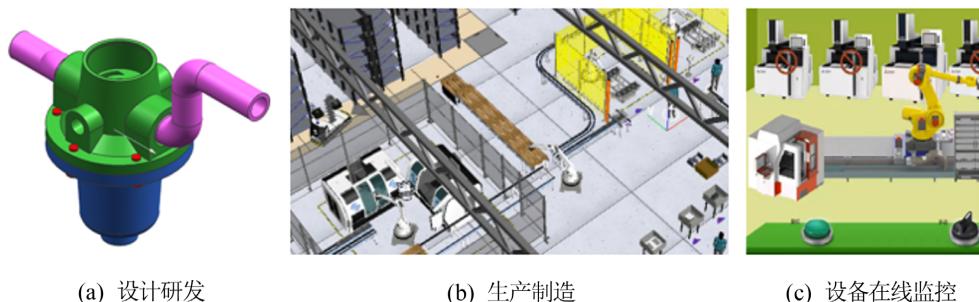


Figure 2. The industry application prospect of digital twin technology

图 2. 数字孪生技术的行业应用前景

其次，从行业应用前景来看，数字孪生技术在机械行业的应用前景愈加广阔，涉及产品设计、生产制造、设备健康监测和维护管理、产品全生命周期管理等。

1) 在机械行业的产品设计和研发领域，构建数字孪生模型可以使设计师在虚拟环境中进行设计验证与优化，对设备进行全面的仿真分析，避免传统设计方式的时间和资源浪费，使设计方案可以得到及时修正有效降低研发成本，提高设计效率与质量[4]-[7]，如**图 2(a)**。张璐瑶(2022)设计了数字孪生驱动下的复杂产品的设计、制造以及服务相互协同开发的框架，测算了对应的协同效率，研究了复杂产品设计-制造-服务协同创新路径[8]。李雪瑞等(2021)以数字孪生技术为基础，构建了工业产品设计服务的模型框架，运用历史知识，简化产品设计复杂度，优化相关产品设计方案[9]。Huang 等(2020)在可重构机床的设计开发中引入数字孪生技术，在虚拟可重构机床模型中进行重构实验，解决复杂的可重构机床设计相关难题[10]。王昊琪等(2020)采用数字孪生技术，构建了五维模型，并详细定义了功能、设计师和设计活动的数字孪生模型，实现了对产品设计复杂性的精准管理，解决产品设计复杂性预测不准确的问题[11]。

2) 在机械行业的产品设计和研发领域，构建数字孪生模型可以使设计师在虚拟环境中进行设计验证

与优化，对设备进行全面的仿真分析，避免传统设计方式的时间和资源浪费，使设计方案可以得到及时修正。在生产制造环节，通过对生产线进行虚拟建模和仿真，在虚拟环境中对制造过程的参数和工艺进行模拟、调试和优化，提高企业生产效率[12] [13]，如图 2(b)。刘世民(2022)从系统框架、模型构建、知识生成和决策自适应四个方面深入研究了数字孪生加工制造系统及其关键技术，并从生产制造实践过程中验证了相关理论和方法[14]。吴定会等(2022)通过搭建车间重调度决策服务系统实现了数字孪生驱动的扰动累积下的车间重调度，利用数字孪生网络技术搭建隐性扰动检测模型，以实时数据为输入实现重调度的启动时刻的判定，同时利用伪孪生网络获取工序和机器的状态数据的映射关系作为调度规则，用于车间的重调度[15]。马靖等(2021)研究了数字孪生驱动的生产单元可视化管控方法，基于边缘计算进行虚实同步，优化了车间生产管控体系[16]。吴鹏兴等(2021)针对离散制造流程中车间的实时监控问题提出了基于数字孪生的可视化实时监控方法，包括数据建模、事件驱动、可视化等，并验证了该方法的有效性[17]。

3) 在设备的健康检测和维护管理上，数字孪生技术显示了显著的优越性。传统设备维修，往往靠定期检查、凭经验判断，不确定因素存在，风险隐患大；但是基于数字孪生技术，通过传感器对设备运行数据进行实时采集，并与虚拟模型进行比对分析，可以精准预测设备故障并进行维护预防设备故障的发生，优化维修策略[18] [19]，如图 2(c)。刘劲松(2022)利用数字孪生技术建立了高档数控机床基于 OPC UA 的数据感知结构，实现数据规范化采集，并开发一种结合卷积神经网络和数控机床故障知识图谱的故障诊断法，以解决高档数控机床故障诊断难和经验利用不足的问题[20]。向胜涛(2022)研究了数字孪生技术在桥梁健康检测方向的应用，建立了机理与数据双驱动的数字孪生温度模型，推动数字孪生在监测领域的发展[21]。上官端森(2022)研究了面向机电系统状态监控与故障诊断的数字孪生技术，提出分层的数字孪生范式和系统架构，实现了故障模型派生等方法，并结合刹车系统展示了具体的应用途径[22]。Andrea 等(2021)利用数字孪生技术对复杂系统进行真实模拟，并生成用于异常检测的合成数据集，使用来自数字孪生模拟的数据对机器的正常运行状态进行异常检测[23]。

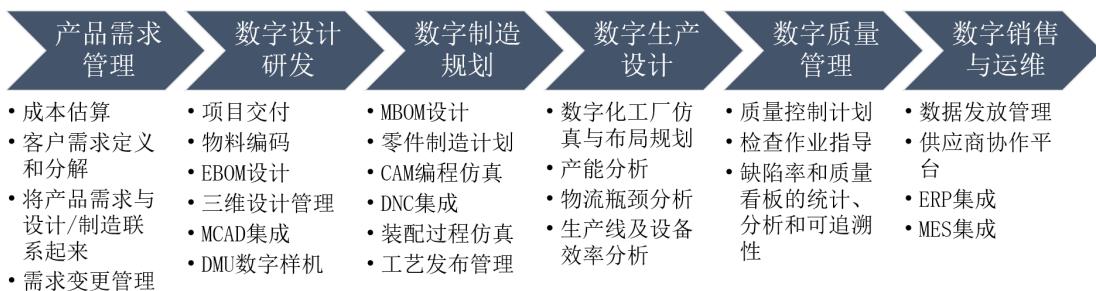


Figure 3. The product lifecycle management based on digital twin technology

图 3. 基于数字孪生技术的产品生命周期管理

4) 在产品全生命周期管理中，通过设备数字孪生模型的建立，实现包括设计、制造、测试、运行和维护在内的设备全生命周期管理，实现资源的高效利用，如图 3；通过对产品运行数据的实时分析与反馈，企业不断优化产品性能，提升产品质量；在设备回收利用过程中准确评估设备剩余价值和使用寿命，制定回收方案，促进资源循环使用，为机械行业可持续发展做出贡献。在工业领域，西门子 SIEMENS 提出数字孪生是实际产品的虚拟表示，可对物理实体性能进行描述和预测，在产品生命周期内进行模拟、预测和优化，使产品全生命周期得到全面优化，提供高品质产品；思爱普 SAP 认为，数字孪生是物理对象的虚拟模型，结合大数据、机器学习和物联网技术，对产品全生命周期数据进行深度挖掘，能够优化服务，促进多领域创新[20]。在具体研究上，彭海波(2023)按照数据环节、建模环节、服务环节等三个主要构建流程，依次启动数字孪生智能工厂研究，进行生产过程的实时监控和精确控制，调度优化能源和

物质流，实现设备和产品的全生命周期管理等功能[24]。WEI 等(2021)对数控机床数字孪生模型的性能衰减更新方法进行了研究，使该模型在机床全生命周期管理内保持一致[25]。王等(2021)提出了构建产品全生命周期虚拟空间的数字孪生框架，以智能工厂为目标建立了驱动智能工厂运行的大数据学习与分析(BDLA)模型[26]。

最后，从未来发展来看，一方面，随着 5G 及相关新兴技术的进一步发展，将大幅提升数据传输的速度和稳定性，为数字孪生的实时监测和控制提供更可靠的保证，使数字孪生技术的应用得到进一步拓展；另外一方面，人工智能技术的融合应用将使数字孪生具有更强的数据分析和决策能力，如采用机器学习算法对设备运行数据进行深入分析，可做到精确的设备故障预测和优化决策。

4. 结语

本文基于机械行业中数字孪生技术的分析，得出数字孪生技术的应用已经在机械行业中逐渐成为一种显著趋势，数字孪生技术的巨大发展潜力和市场需求正在迅速攀升。在机械行业中，引入数字孪生技术后，不仅有效提升了生产效率和产品质量，同时显著降低了维护和运营成本。未来随着 5G 通讯、人工智能等信息化技术的进一步发展，数字孪生将在机械行业得到更广泛深入地普及和应用。

基金项目

广东省继续教育质量提升工程项目“工业 4.0 (智能制造)关键技术与应用”(项目编号 JXJYGC2021BY0063)；广东省普通高校青年创新人才项目(项目编号 2019GKQNCX029)“基于生物基可降解 PLA 复合材料的加工制备工艺和增韧阻燃性能改进研究”。

参考文献

- [1] 光新军, 李婧, 闫娜, 等. 基于专利分析的智慧油气藏数字孪生技术发展态势及建议[J]. 石油科技论坛, 2024, 43(2): 83-94.
- [2] 罗泰晔. 制造业数字创新生态系统共生机制研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- [3] 李琳利, 顾复, 李浩, 等. 仿生视角的数字孪生系统信息安全框架及技术[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(3): 419-435.
- [4] 张鹏, 冯浩, 杨通达, 等. 数字孪生与 TRIZ 集成迭代参数演化创新设计过程模型[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1361-1370.
- [5] Xiang, F., Zhang, Z., Zuo, Y. and Tao, F. (2019) Digital Twin Driven Green Material Optimal-Selection towards Sustainable Manufacturing. *Procedia CIRP*, **81**, 1290-1294. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.015>
- [6] 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.
- [7] 李浩, 陶飞, 王昊琪, 宋文燕, 张在房, 樊蓓蓓, 武春龙, 李玉鹏, 李琳利, 文笑雨, 张新生, 罗国富. 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.
- [8] 张璐瑶. 复杂产品设计-制造-服务的协同设计及创新路径研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海海事大学, 2022.
- [9] 李雪瑞, 侯幸刚, 杨梅, 等. 数字孪生驱动的工业产品 CMF 设计服务模型构建与应用[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 307-327.
- [10] Huang, S., Wang, G. and Yan, Y. (2020) Building Blocks for Digital Twin of Reconfigurable Machine Tools from Design Perspective. *International Journal of Production Research*, **60**, 942-956. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1847340>
- [11] 王昊琪, 李浩, 文笑雨, 等. 基于数字孪生的产品设计过程和工作量预测方法[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(1): 17-30.
- [12] Ward, R., Sun, C., Dominguez-Caballero, J., Ojo, S., Ayvar-Soberanis, S., Curtis, D., et al. (2021) Machining Digital Twin Using Real-Time Model-Based Simulations and Lookahead Function for Closed Loop Machining Control. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **117**, 3615-3629. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07867-w>

-
- [13] 宋思蒙, 蒋增强, 马靖, 等. 基于数字孪生的模块化生产系统运行机制及重构方法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 510-520.
 - [14] 刘世民. 面向切削加工过程的产品数字孪生拟态建模与自适应演化方法[D]: [博士学位论文]. 上海: 东华大学, 2022.
 - [15] 吴定会, 张桐瑞, 张秀丽. 扰动累积下基于数字孪生的车间重调度[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(3): 573-583.
 - [16] 马靖, 王译晨, 赵明, 等. 基于数字孪生的生产单元可视化管控[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(5): 1256-1268.
 - [17] 吴鹏兴, 郭宇, 黄少华, 等. 基于数字孪生的离散制造车间可视化实时监控方法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(6): 1605-1616.
 - [18] Deebak, B.D. and Al-Turjman, F. (2021) Digital-Twin Assisted: Fault Diagnosis Using Deep Transfer Learning for Machining Tool Condition. *International Journal of Intelligent Systems*, **37**, 10289-10316.
<https://doi.org/10.1002/int.22493>
 - [19] Xiong, M., Wang, H., Fu, Q. and Xu, Y. (2021) Digital Twin-Driven Aero-Engine Intelligent Predictive Maintenance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **114**, 3751-3761.
<https://doi.org/10.1007/s00170-021-06976-w>
 - [20] 刘劲松. 高档数控机床数字孪生关键技术研究与应用[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 中国科学院沈阳计算技术研究所, 2022.
 - [21] 向胜涛. 面向健康监测的斜拉桥钢箱组合梁数字孪生温度模型及其应用研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2022.
 - [22] 上官端森. 面向机电系统状态监控和诊断的数字孪生关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
 - [23] Castellani, A., Schmitt, S. and Squartini, S. (2021) Real-World Anomaly Detection by Using Digital Twin Systems and Weakly Supervised Learning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **17**, 4733-4742.
<https://doi.org/10.1109/tii.2020.3019788>
 - [24] 彭海波. 面向数字孪生的钢铁冶金企业智能工厂建设研究与实践[D]: [博士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2023
 - [25] Wei, Y., Hu, T., Zhou, T., Ye, Y. and Luo, W. (2021) Consistency Retention Method for CNC Machine Tool Digital Twin Model. *Journal of Manufacturing Systems*, **58**, 313-322. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.002>
 - [26] Wang, P. and Luo, M. (2021) A Digital Twin-Based Big Data Virtual and Real Fusion Learning Reference Framework Supported by Industrial Internet Towards Smart Manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, **58**, 16-32.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.11.012>