

The Application of Digital Twins in Intelligent Equipment Manufacturing

Zhenfu Zhang

Zibo Industrial Economic Development Promotion Center, Zibo, Shandong, 255000, China

Abstract

This paper focuses on the application of digital twin technology in the field of intelligent equipment manufacturing, and deeply explores its technical principles, application models and practical value. By analyzing the background and significance of the integration of digital twins and intelligent equipment manufacturing, the core role of digital twins in product design, production and manufacturing, operation and maintenance services and other links is revealed. The research finds that digital twin technology, by constructing a virtual mapping model of physical entities, realizes real-time data interaction and dynamic simulation, which can significantly improve the efficiency of equipment design, optimize the production process, and reduce operation and maintenance costs. Moreover, solutions are proposed for the technical bottlenecks and data security issues existing in current applications. To provide theoretical basis and practical reference for promoting the upgrading of the intelligent equipment manufacturing industry.

Keywords

Digital Twin Intelligent equipment manufacturing Full life cycle management Virtual simulation Industrial Internet

数字孪生在智能装备制造中的应用

张振富

淄博市工业经济发展促进中心, 中国 · 山东 淄博 255000

摘 要

本文聚焦数字孪生技术在智能装备制造领域的应用, 深入探讨其技术原理、应用模式及实践价值。通过分析数字孪生与智能装备制造融合的背景与意义, 揭示其在产品设计、生产制造、运维服务等环节的核心作用。研究发现, 数字孪生技术通过构建物理实体的虚拟映射模型, 实现数据实时交互与动态仿真, 能够显著提升装备设计效率、优化生产流程、降低运维成本, 并针对当前应用中存在的技术瓶颈、数据安全等问题提出解决方案, 为推动智能装备制造产业升级提供理论依据与实践参考。

关键词

数字孪生; 智能装备制造; 全生命周期管理; 虚拟仿真; 工业互联网

1 引言

随着工业 4.0 与智能制造战略的推进, 智能装备制造已成为制造业转型升级的核心驱动力。智能装备不光需具备高度自动化与智能化功能, 还需要完成全生命周期的精准管理及优化, 融合了物联网、大数据、人工智能等前沿技术的创新手段——数字孪生技术, 采用构建物理实体在虚拟空间的镜像模型做法, 达成对装备全生命周期的实时映射及动态优化处理, 为智能装备制造铺就了新的技术坦途。就目前的发展现实情况看, 于航空航天、汽车制造、工程机械等领域, 数字孪生技术初步应用成果已达成, 然而在智能装备制造深度融合及全面推广的实践里, 仍面临诸多挑战, 亟待攻克的问题有怎样高效采集和融合多源异构数据、怎样构建高精度

的虚拟模型以及怎样保障数据安全与隐私。深入研究数字孪生在智能装备制造中的应用, 对于提升装备性能、降低制造成本、推动制造业高质量发展具有重要的理论与现实意义。

2 数字孪生技术概述

2.1 数字孪生的基本概念

所谓数字孪生, 是在虚拟空间创建与物理实体对应的数字化模型, 运用物联网、传感器等技术达成物理实体和虚拟模型间数据的实时交互及双向映射关系, 该模型除包含物理实体几何结构、材料属性等静态资讯外, 还可实时体现其诸如运行状态、性能参数等动态数据, 由此达成对物理实体全生命周期的精准管理与可视化监控^[1]。

2.2 数字孪生技术架构

数字孪生技术主要由数据层、模型层、平台层和应用层四个层次搭建起数字孪生技术架构, 数据层借助传感器、工业互联网等装置收集物理实体的多源异构数据; 模型层借

【作者简介】张振富 (1982-), 男, 本科, 工程师, 从事智能装备研究。

助三维建模、仿真分析等技术打造高精度虚拟模型；平台层实现对数据的存储、处置与剖析，并给出数据交互以及协同服务；应用层凭借平台数据及模型，开发多种应用场景实例，诸如设备监控、故障预察、优化决断之类。

数字孪生跟智能装备制造结合可创造三大核心价值：借助虚拟仿真对装备设计方案加以优化，缩短开发周期；二是于生产进程里开展实时的监控与调整，增进制造精度和效率水平；三是在运维阶段对设备状态进行预测并实施健康管理，减少维护开支，该融合为智能装备制造给予了从设计到服务全链条的优化途径，促进制造业往智能化、数字化方向升级。

3 数字孪生在智能装备制造中的应用场景

3.1 产品设计阶段的应用

当处于智能装备制造产品设计阶段，数字孪生技术构建出一套从概念构想至方案验证整个流程的虚拟验证系统，极大提升设计质量及效率，处于传统设计模式期间，装备研发需借助物理样机反复做测试，既让周期变得很长，又让成本大幅增加，而且难以对复杂工况开展全面模拟，而数字孪生凭借集成计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工程(CAE)等技术，可在虚拟空间内构建1:按照1:1搭建的装备三维模型，完成多学科与多物理场的联合仿真操作^[2]。

3.2 生产制造阶段的应用

在生产制造阶段，数字孪生技术采用构建生产过程的虚拟副本方式，达成制造全流程的实时查看、动态改进与质量倒查，依靠安装到生产设备上的传感器，实时采集设备运行的各项参数、加工工艺数据及物料状态情况，即刻同步输送至虚拟模型，以实施数控机床加工为例，数字孪生模型能实时呈现出刀具转速、进给量、切削力等参数内容，并借助与预设工艺标准的对比，迅速对异常工况给出预警。

依靠数字孪生可达成生产排程与资源调度的智能优化，通过模拟不同生产计划里设备负荷、物料流动及能耗的情况，系统能自动形成最优排产方案，在智能工厂这个空间，数字孪生模型可依照订单优先级、设备的可用程度及物料库存状态，即时改变生产线的加工顺序及资源分派，减轻设备闲置的时间占比，带动整体生产效率上扬，利用数字孪生技术可精准追溯质量上的问题，倘若产品显现出质量缺陷，系统可对生产过程中的工艺参数、设备状态以及操作人员信息进行回溯，迅速锁定问题源头。

3.3 运维服务阶段的应用

处于智能装备运维服务的阶段，设备全生命周期健康管理依靠数字孪生技术得到了革命性解决方案，凭借打造设备的数字孪生对象，实时展现装备运行状态、性能的退化以及故障隐患，实现从被动应对维修到主动开展运维的转变，利用数字孪生可实时开展设备状态监测与故障预测，系统将齿轮箱振动数据、发电机温度数据和叶片应力数据进行采集，采用机器学习算法打造故障预测模型，要是模型预测某

部件剩余寿命低于所设阈值，即刻生成维护工单，同时举荐最恰当的维修方案^[3]。

远程运维与虚拟调试得到数字孪生的支持，技术人员可借助远程方式访问设备数字孪生模型，实时掌握设备运行参数、开展故障检测与程序调试工作，无需亲身抵达现场，在工业机器人维护这个工作里，工程师可在虚拟环境去模拟机器人的运动轨迹，审定程序修改的可行性，防止现场调试引发的停机局面，还可运用数字孪生对装备的性能进行优化与升级，对设备历史运行数据展开分析，评价不同工况下产能表现及能耗效率，给出工艺参数优化建议及设备改造具体解决办法。

4 数字孪生应用面临的挑战与对策

4.1 面临的挑战

4.1.1 数据采集与融合难题

处于智能装备制造场景当中，数据来源呈现高度分散的特性，在装备运行这个阶段，诸如传感器、PLC控制器、工业机器人等设备能产生结构化数据，像运行参数、控制指令，也需将设计图纸、仿真模型等非结构化数据纳入管理范畴，各个设备厂商的数据接口协议差异明显，Modbus、OPC UA、Profinet等通信协议一同并存，造成数据的兼容性差。

4.1.2 模型构建与优化困难

要构建高精度数字孪生模型，得兼顾物理实体几何结构、材料属性、动力学特性等维度的多元信息，就大型工程机械装备而言，其结构复杂多样，存在着流体、机械、电气等多学科耦合关系，传统建模方案难以实现精度要求，模型构建进程消耗大量计算资源，诸如三维建模、有限元分析这类操作，对硬件配置的要求极为苛刻，受成本压力所困，中小企业难以实施相关工作，物理实体运转时会现性能衰退、结构改变等动态变化，为与实体保持一致，模型得实时更新，但现有模型更新机制大多依赖人工实施干预，自动操作水平欠佳，导致模型与实际工况出现滞后，无法精准呈现装备当前状态。

4.1.3 数据安全与隐私保护

数字孪生系统对装备全生命周期数据加以集成，涉及到设计图纸、工艺参数、用户操作习惯等敏感数据，在数据传输的阶段里，工业互联网环境里，网络攻击(像DDoS攻击、数据窃取等情况)也许会让核心数据泄露。

4.1.4 标准与规范缺失

就目前而言，数字孪生技术无统一行业标准，造成不同企业、不同系统的互操作性难以达成，以数据层面的角度观，数据格式和编码规则依旧未统一，就像有部分企业采用JSON格式对设备状态数据进行存储，另外一部分企业采用XML格式，拉高了数据共享的难度水平，从模型构建的角度而言，建模流程、精度评估及模型接口等未具备标准化规范，让不同厂商研制的数字孪生模型无法达成相互兼容^[4]。

4.2 应对策略

4.2.1 完善数据采集与处理体系

凭借“边缘计算+5G”技术架构优化数据采集的效能，在装备实地安置边缘计算节点，实时针对传感器原始数据进行过滤、净化和初步研判，减少非有效数据的传输；凭借5G网络体现出的低时延、高带宽特性，保障关键数据迅速上传到云端平台成为现实。

4.2.2 优化模型构建与管理

开发智能建模工具，用人工智能及机器学习技术达成模型的自动化组建，用深度学习算法对装备历史运行数据进行解析，自动衍生动力学模型；用生成式对抗网络（GAN）对三维模型细节实施优化，减少人工开展建模的工作量，构建模型全生命周期的管理机制，利用数据驱动实现模型的动态更迭。要是物理实体运行数据与模型预测结果出现了偏差，系统自行触发模型校正流程，采用最新数据对模型参数做优化，推行轻量化模型相关技术，采用模型压缩、简化算法的手段减少模型计算复杂度，令其适配不同性能规格的硬件设备，弱化企业应用的门槛约束。

4.2.3 加强数据安全防护

搭建起“端-边-云”协同的数据安全防护架构，就终端设备层面，借助可信执行环境（TEE）技术保障传感器数据采集的安全；在边缘计算节点装设入侵检测系统（IDS）及防火墙，抵御非法的访问行径；云端采用数据加密（像国密算法SM4这样的）、访问控制（实行RBAC角色权限管理）、区块链等技术，保证数据存储及共享安全无虞^[5]。

4.2.4 推动标准与规范建设

行业协会担当牵头角色，联合科研院所、龙头企业一起制定数字孪生技术标准，处在数据标准维度，让数据格式、通信协议及接口规范统一起来，助力OPC UA、MTConnect等通用协议普及应用落地；就模型标准这一方面而言，出台

建模流程规范、模型精度评估指标及接口相关标准，提高模型互操作的水平。已发布《数字孪生应用白皮书》的是中国智能制造系统解决方案供应商联盟，为行业的发展给予指引，创建数字孪生项目认证体系，利用第三方机构对项目技术合规性及应用效果做评估，促进该行业实现规范化成长，激励企业参与国际标准的编订，抬高我国在数字孪生领域的话语地位，加快技术在全球的应用及合作步伐。

5 结论

作为智能装备制造关键支撑的数字孪生技术，在产品设计与生产制造以及运维服务等诸多环节，呈现出极大的应用潜能，依靠构建物理实体的虚拟映射样板，实现数据实时互换与动态仿验，数字孪生技术能切实增进装备制造的智能化层级，减少装备生产开支，增强企业的竞争潜力。即便当下数字孪生技术在应用时还面临着数据采集、模型构建、安全保护等方面的阻碍，然而随着技术不停歇地发展与完备，于智能装备制造领域，数字孪生会起到更关键的效用，推动制造业迈向高质量发展阶段，应进一步增进数字孪生技术的研究与创举，提升其在智能装备制造中的应用水平，为制造业的转型升级注入源源不断的动力。

参考文献

- [1] 任俊恩.数字孪生技术在智能机械加工制造中的应用[J].装备制造技术,2024,(08):142-144.
- [2] 韦兰花,黄亮.数字孪生技术在智能制造中的应用[J].电子技术,2024,53(04):366-368.
- [3] 江海凡,丁国富,肖通,等.数字孪生演进模型及其在智能制造中的应用[J].西南交通大学学报,2022,57(06):1386-1394.
- [4] 许可.基于数字孪生的机械加工工艺在智能制造中的应用研究[J].新型工业化,2021,11(05):89-90+93.
- [5] 黄海松,陈启鹏,李宜汀,等.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(05):1-8.