

基于大语言模型的人工智能在数字孪生技术中的应用融合与展望

李超月

天津市特种设备监督检验技术研究院,国家市场监督管理总局重点实验室(特种设备数字孪生共性技术)

DOI:10.32629/acair.v3i4.17923

[摘要] 数字孪生技术通过实时同步、虚实映射、数模联动的多尺度高保真动态仿真,实现实体设备与虚拟模型实时交互与未来演变趋势的预测。然而,传统的数字孪生技术在机理分析、自适应决策和人机交互方面面临诸多挑战,尤其是在处理复杂环境和多模态数据时。近年来,基于大语言模型的人工智能技术,利用其强大的语义理解、逻辑推理和通用认知能力,为数字孪生技术的智能化升级提供了全新的路径。本文探讨了人工智能与数字孪生技术的融合机制,回顾了其在系统决策与配置优化、孪生模型动态更新、运维管理与故障预测、智能人机交互平台、全生命周期管理和数据智能标注等核心应用领域的实践,并对未来的研究方向进行了展望。旨在为构建下一代“认知型”数字孪生技术提供理论基础与实践参考。

[关键词] 人工智能; 大语言模型; 数字孪生技术; 多模态数据融合; 自适应优化

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

Integration and Prospects of Large Language Model-Based Artificial Intelligence in Digital Twin Technology

Chaoyue Li

Tianjin Special Equipment Supervision and Inspection Technical Research Institute, Key Laboratory of Digital Twin Common Technology for Special Equipment (under the State Administration for Market Regulation)

[Abstract] Digital twin technology achieves real-time interaction between physical equipment and virtual models, as well as prediction of future evolution trends, through multi-scale high-fidelity dynamic simulation with real-time synchronization, virtual-physical mapping, and numerical-model linkage. However, traditional digital twin technology faces numerous challenges in mechanistic analysis, adaptive decision-making, and human-machine interaction, particularly when dealing with complex environments and multimodal data. In recent years, artificial intelligence based on large language models has provided a novel pathway for the intelligent upgrade of digital twin technology by leveraging its powerful semantic understanding, logical reasoning, and universal cognitive capabilities. This paper explores the integration mechanisms of AI and digital twin technology, reviews its practical applications in core domains such as system decision-making and configuration optimization, dynamic twin model updates, operation and maintenance management with fault prediction, intelligent human-machine interaction platforms, full lifecycle management, and data intelligent annotation, and offers prospects for future research directions. The aim is to provide theoretical foundations and practical references for building next-generation "cognitive" digital twin technology.

[Key words] artificial intelligence; Large Language Model (LLM) Digital twin technology; multimodal data fusion; adaptive optimization

引言

随着工业5.0和智慧城市等概念的不断深入,数字孪生技术从理论构建到实践应用,已经成为赋能制造业和城市管理的关键技术。数字孪生技术通过实时同步、虚实映射、数模联动的多尺度高保真动态仿真,实现实体设备与虚拟模型实时交互与未来演变趋势的预测。该技术通过构建与物理实体一致的多保

真虚拟实体,并借助实时同步、虚实映射、数模联动的多尺度高保真动态仿真,实现实体设备与虚拟模型的动态映射和预测分析。然而,传统的数字孪生技术在很大程度上仍依赖于预设行为规则和机理模型,在处理非结构化数据、理解复杂语境和实现高层次自主决策方面存在明显不足^[1]。

与此同时,大模型技术的飞速发展,尤其是大语言模型取得

了突破性进展。这些模型不仅在自然语言处理任务中表现出色,在代码生成、多模态数据融合和复杂逻辑推理等方面也展现出强大潜力。将大模型与数字孪生技术相结合,已成为突破现有技术瓶颈的关键方向。通过融合大模型的认知能力与数字孪生的物理建模优势,可推动数字孪生从“静态映射”向“动态认知与自我进化”转型^[2]。

本文系统回顾了大模型在数字孪生中的前沿应用,分析了其融合机制,并对当前面临的挑战及未来发展趋势进行探讨,以期为下一代“认知型”数字孪生技术的构建提供理论依据与实践参考。

1 大模型与数字孪生融合架构与赋能机制

1.1 数据处理与理解

数字孪生系统在运行过程中持续接收来自物理实体与环境的海量异构数据,包括传感器实时读数、多源图像与视频流、设备维护报告等多种模态信息。此类数据体量庞大,且具有高维度、强噪声与多源异构等特征,传统方法在统一解析与语义理解方面存在瓶颈。

在此背景下,大语言模型凭借其强大的跨模态语义理解与逻辑推理能力,在数据处理中扮演“智能语义解码器”的关键角色。它能够融合文本、图像、时序信号等多种信息源,实现对复杂数据环境的语义统一解析。此外,大模型还能结合领域知识进行上下文感知的数据增强与语义补全,从而提升数字孪生系统对复杂工况与突发状况的理解能力,为后续建模、仿真与决策提供高质量、可解释的数据基础,显著增强系统在真实工业场景中的适应性与智能化水平。

1.2 模型构建与更新

传统数字孪生模型的构建与更新高度依赖精确的物理机理与专家经验,过程繁琐且耗时,难以适应快速变化的复杂环境与多样化运行工况。大模型为核心模型的快速构建与动态演化提供了全新范式,显著提升了数字孪生模型的构建效率、泛化能力与自适应性。大模型赋能下的模型构建与更新,可形成“数据驱动感知-模型自主演化-虚实闭环验证”的动态循环。模型能够持续从实时数据流中学习,自动调整其内部表征与预测逻辑,从而实现从物理实体从宏观行为到微观机理的多尺度高保真模拟,推动数字孪生从静态的、需人工干预的“数字镜像”向动态的、具备自我进化能力的“智能体”转变。

1.3 决策与交互

在数字孪生技术的应用中,大模型赋能系统进行更加高效和精准的决策制定。传统的决策支持系统往往依赖于静态的规则库和算法,无法应对复杂环境中的动态变化,而大语言模型通过融合来自物理实体、虚拟模型、历史数据库及环境上下文的多维信息,构建出对系统整体运行状态的深度情境感知,为实现更高阶的自主决策与自然交互奠定了基石。

除了决策支持外,大模型还具备强大的自然语言处理能力,使其能够与操作人员进行便捷的交互。这一能力极大地简化了操作人员与系统之间的沟通,避免了对复杂底层代码和系统机

制的深入理解。这种人性化的交互方式使得数字孪生技术能够更广泛地应用于各种行业领域,包括工业制造、城市管理、医疗监控等,极大地提升了系统的应用便捷性和实际效用。

2 大模型在数字孪生中的核心应用场景

2.1 系统决策与配置优化

在复杂工业系统中,数字孪生技术的核心目标之一是实现自适应控制和自优化决策。通过大模型的强大计算能力和数据处理能力,数字孪生能够不断提取物理系统的内在规律与趋势,及时调整决策,从而提高系统的灵活性和响应速度。丁勇^[3]构建了融合数字孪生与AI的实验平台,通过基于深度学习的异常检测系统识别生产偏差,并结合强化学习与遗传算法对生产参数进行优化,最终将生产效率提升了约12%,能耗降低了约15%。这充分证明,大模型能够将数据驱动的洞察转化为可量化的经济效益。

2.2 孪生模型动态更新

数字孪生技术的核心价值在于其虚拟模型与物理实体之间持续、高保真的同步性。大模型的出现,为解决这一瓶颈提供了全新的技术路径,通过其强大的迁移学习、多模态融合与上下文推理能力,驱动孪生模型从“静态”向“动态演化、自主进化”的智能体转变。闫纪红等人^[4]提出了基于状态的孪生模型自适应更新策略,通过挖掘历史大数据中的潜在关系,自动修正模型的属性和规则,以同步实际生产状态,有效解决了加工过程中仿真数据与实际数据不匹配的难题。

2.3 运维管理与故障预测

在数字孪生技术的应用体系中,运维管理与故障预测是数字孪生技术实现价值的关键环节,其目标是从海量运维数据中洞察设备健康状态、预警潜在故障并规划最优维护策略。大模型凭借其卓越的模式识别、上下文推理及多模态信息融合能力,为这一领域带来了革命性突破,使数字孪生系统能够实现从“事后响应”到“事前预警”与“智能干预”的转变。在工业领域,王晓慧^[5]指出,将大模型与钢铁行业的数字孪生相结合,能够对来自不同生产环节的海量数据进行综合分析,智能识别其中不显著的潜在模式和趋势,从而实现更准确的预测、决策支持,乃至模型的自我维护与升级。这种能力在关键设备管理中尤为突出。张等人^[6]开发了一套基于视觉语言大模型微调的变压器监控维护系统。该系统不仅能实时监控设备状态,还能融合视觉图像与溶解气体分析等多模态数据,进行故障推理并生成可解释的维护策略,同时具备自然语言对话能力,极大提升了运维的直观性与效率。

2.4 人机交互与智能控制平台

大语言模型的发展彻底重构了传统的人机交互模式,使数字孪生系统从基于规则的界面操作向自然语言驱动的智能交互全面演进。在此基础上,数字孪生技术逐渐具备“可理解指令、可生成策略、可执行控制”的认知能力,有效提升了人机协同效率与交互智能水平。在智慧建筑领域,许璟琳等人^[7]建立了融合大模型的运维系统,通过基于检索增强生成(RAG)的技术高效管

理运维知识,并创新了基于大模型的运维服务高效调用方法。该系统允许管理人员通过自然语言指令直接查询设备状态或执行控制命令,将复杂的底层操作封装在对话背后,最终在实际应用中收获了89%的用户满意率,充分证明了其在降低技术壁垒、提升协作效率方面的价值。

2.5 全生命周期管理与数据智能标注

数字孪生的核心理念在于对物理实体或系统全生命周期的精准映射与闭环管理,而大模型的出现为这一理念的深化落地提供了强大的认知引擎。它不仅能够贯穿设计、制造、运维等各个阶段,实现跨阶段的知识传承与协同优化,更能在数据源头通过智能标注技术,为整个数字孪生体系提供高质量的数据基石,从而形成从“数据智能”到“生命周期智能”的完整赋能闭环。江秀臣等人构建的大模型,在设计阶段,能够学习海量设计规范与历史运行数据,将经验应用于新设备的智能设计中;在制造阶段,通过分析良品率、故障信息等数据,持续优化制造流程并为不同设备定制个性化生产方案;在运维与状态评估阶段,其多模态数据分析能力更是实现了对小样本故障的智能诊断与历史运行数据的修补恢复。

3 挑战与未来展望

尽管大模型为数字孪生带来了革命性的变化,但其深度融合和广泛应用仍面临诸多挑战:

可解释性与可信性: 在如设备剩余寿命预测等高风险场景中,AI决策的“黑箱”特性是其应用的主要障碍。提高AI模型的透明度和可解释性,增强用户信任,是确保系统安全稳定的关键。

算力需求与实时性: 大模型的训练和推理需要大量计算资源,这对于需要实时响应的数字孪生技术来说是一个严峻考验。未来的研究需要通过模型轻量化、边缘计算和云边协同等技术来平衡性能与效率。

多模态数据融合与知识泛化能力: 如何确保大模型能够准确理解和关联来自物理世界的复杂、动态信息,并在未见过的场景中保持稳健的性能,仍需持续探索。

大模型与数字孪生的融合将朝着更智能、更自适应、更协同的方向发展。我们有望看到由多智能体和大模型协同驱动的群体数字孪生,具备更强的分布式认知与协同决策能力。随着技术的发展,“认知孪生”将成为下一代数字孪生的核心形态,它不仅是对物理实体的镜像,更是一个具备自主学习、推理和进化

能力的智能伙伴,最终为各行各业实现智能化转型提供核心驱动力。

4 结论

作为人工智能领域的前沿技术,大模型凭借其强大认知与生成能力,深度赋能数字孪生技术,解决复杂决策、模型更新、人机交互等方面的长期痛点。本文系统探讨了大模型在数字孪生多个核心应用场景中的实践与成效,揭示其通过语义理解、多模态融合与持续学习等机制,推动数字孪生向更高层次智能化迈进。尽管在可解释性、算力与数据融合等方面仍存挑战,该交叉领域潜力巨大。未来研究应致力于构建更透明、高效、稳健的融合架构,推动数字孪生从精准“镜像”进化为智慧“伙伴”,为智能制造、智慧城市等国家战略提供坚实技术支撑。

[基金项目]

天津市市场监督管理委员会科技计划项目(项目编号:2021-W01、2022-W06);天津市科技局科技支撑重点项目(项目编号:23YFZCSN00080)。

[参考文献]

[1] 闫纪红,姬思阳.大数据驱动的车间数字孪生模型构建方法[J].机械工程学报,2023,59(12):62-77.

[2] 姜伟波,马军.CIM+AI大模型在新区数字孪生城市一体化应用与趋势探讨[J].建设科技,2024,(17):87-90.

[3] 丁勇.基于数字孪生和人工智能在工业大数据治理中的融合应用研究[J].山西电子技术,2025,(01):119-122.

[4] 王晓慧,田天弘,覃京燕,等.工业数字孪生数据建模在钢铁行业中的应用研究[J].包装工程,2024,45(08):11-20+517.

[5] Zhang X, Sun W, Chen K, et al. A multimodal expert system for the intelligent monitoring and maintenance of transformers enhanced by multimodal language large model fine-tuning and digital twins[J]. IET Collaborative Intelligent Manufacturing, 2024, 6(4).

[6] 许璟琳,彭阳,欧金武,等.融合大模型和数字孪生的公共建筑智慧运维系统[J].图学学报,2024,45(06):1200-1206.

[7] 江秀臣,臧奕茗,刘亚东,等.电力设备ChatGPT类模式与关键技术[J].高电压技术,2023,49(10):4033-4045.

作者简介:

李超月(1993--),男,汉族,山西省大同市人,硕士研究生,工程师/研发工程师,研究方向:电磁无损检测新技术和新方法。