

数字孪生技术在石油化工企业数字化转型中的应用

袁立娟

石化盈科信息技术有限责任公司, 北京 100007

DOI: 10.61369/SSSD.2025110007

摘 要： 我国的智能工厂建设正逐步由“2.0”向“3.0”迈进，其中，数字孪生技术为该进程的有序推进提供了强有力的技术支撑，是实现物理世界对接信息世界的关键所在。对于石油化工企业而言，在其数字化转型的进程中，数字孪生技术的应用场景涵盖炼化装置实时监控、仪表故障监测、装置级优化和控制等诸多方面。本文聚焦石油化工企业，在简要阐述数字孪生关键技术的基础上，对数字孪生技术在石油化工企业数字化转型中的应用场景进行了详细阐述并对其应用进行了思考和展望，以期能加速石油化工企业数字化转型进程，为其他相关企业应用数字孪生技术提供理论参考与实践借鉴。

关 键 词： 数字孪生技术；石油化工企业；数字化转型；应用；展望

Application of Digital Twin Technology in the Digital Transformation of Petrochemical Enterprises

Yuan Lijuan

Petro-Cyber Works Information Technology Co., Ltd., Beijing 100007

Abstract： The construction of smart factories in China is gradually advancing from the "2.0" stage to the "3.0" stage. Among them, digital twin technology provides strong technical support for the orderly advancement of this process and is the key to connecting the physical world with the information world. For petrochemical enterprises, in the process of their digital transformation, the application scenarios of digital twin technology cover many aspects such as real-time monitoring of refining and chemical equipment, instrument fault monitoring, and equipment-level optimization and control. Focusing on petrochemical enterprises, this paper briefly expounds the key technologies of digital twin, then elaborates in detail on the application scenarios of digital twin technology in the digital transformation of petrochemical enterprises, and conducts thinking and prospects on its application. It is expected to accelerate the digital transformation process of petrochemical enterprises and provide theoretical references and practical insights for other related enterprises to apply digital twin technology.

Keywords： digital twin technology; petrochemical enterprises; digital transformation; application; prospect

引言

石油化工企业作为我国支柱产业部门的关键组成之一，涵盖勘探开发、炼化生产、仓储运输等全产业链环节。随着智能制造时代的来临，石油化工企业的发展面临着前所未有的机遇和挑战。越来越多企业为了迎合经济与科学技术发展的大趋势，积极探索数字化转型路径，其中非常重要的一项举措就是引进数字孪生技术，以先进的技术推动全产业链的自动化、智能化转型升级，为企业的可持续发展注入源源不断的新动能。

一、数字孪生的关键技术

（一）融合建模

融合建模具有多领域、多尺度等显著特征。其中，多领域具体是指除了特定领域外，还可以涉及其他领域的模型，通过有机整合、集成数据，形成属性多样的综合模型；多尺寸具体指的是能多维度拓展单尺寸模型，通过合理调节物理参数，将处于不同

时间状态下的同一模型连接起来，同时，针对性分析各个时间模型的工作状态，从而提高模型精度^[1]。

（二）数据采集与传输

高质量、实时性的数据采集与传输是数字孪生系统有效运行的根本保障。其中最为关键的是物理实体与数据模型之间保持及时且准确的数据传输。首先，数据是影响模型精准度的关键因素。数据质量越高，那么模型的精准度也会随之提升。这对数据

传感器的稳定性、灵敏度提出了更高要求，尤其应确保即使被应用于复杂工业环境中也能实现稳定的数据采集与传输^[3]。其次，高速也是数据传输的基本要求，这是实现孪生体对物理实体状态实时跟踪且及时反馈的根本保障。总而言之，稳定、高速是数据采集与传输的两大基本特征，唯有如此，才能获得兼具实时性与高质量的数字孪生体。

（三）沉浸式交互应用

相较于传统管理系统，数字孪生技术的独特优势在于能实现可视化展示，让交互性更强，使沉浸式体验成为可能。管理者可以借助虚拟现实、增强现实等技术手段，更清晰地了解设备实时运行状态。通过实时查看三维可视化模型，管理者可以实时掌握物理实体的运行状态、报警信息、运行趋势等相关数据，继而做出正确决策，增强沉浸式体验感^[3-4]。

（四）高性能计算

数字孪生对实时性提出了更高要求。因而，数字孪生系统应具备强大的数据处理与运算能力，以此来提升数据处理的质量和效率。然而，由于图形渲染也需要耗费大量的计算资源，因而，数字孪生系统还应具备高效的图形渲染能力。考虑到目前硬件发展水平较为缓慢，可以结合分布式云计算与边缘计算等技术提升算力，与此同时，优化数据分布层次、存储形式与检索方式，以此来减少冗余，实现系统的高性能运行^[5]。

二、数字孪生技术在石油化工企业数字化转型中的应用场景

（一）数字孪生：生产应用架构

炼化装置具有结构复杂、工艺精密等显著特征，是石油化工企业的核心生产单元。石油化工企业数字化转型的核心就是推动炼化装置的数字化转型，这要求企业应提高对炼化装置运用数字孪生技术的重视程度。数字孪生技术在炼化装置生产中应用的突出优势表现为可以构建与炼化实体装置高保真对应的虚拟模型，同时，集成传感器实时数据、工艺机理模型与历史运行信息，更为重要的是能够在虚拟空间中多物理量、多尺度的动态仿真炼化实体装置中的核心业务及装置本身的运行状态，并通过实现完美映射，反映物理实体的实时运行，这样，有利于实时监控并模拟优化实体装置的整体健康状态，在重要时机为生产操作提供关键决策支持，使装置具有更高性能，提高其生产效率^[6]。

（二）数字孪生：仪表故障监测

石油化工企业需要的仪表数量多。多数情况下，仪表的结构复杂且类型多样，有时会被安装在复杂、恶劣的工业环境中。有的仪表负责测量温度、压力、流量、流量等关键要素，有的主要负责分析成分，但不论哪种功能类型的仪表均对石油化工企业的安全稳定运行发挥着至关重要的作用。研究表明，仪表运行的准确性直接关系着对应装置运行的稳定性和安全性，同时，还与企业整体的生产安全乃至经济效益息息相关。通过实时监测仪表运行状态，相关人员可以及时发现异常并采取科学有效的应对措施，将问题扼杀在摇篮内。而传统的监测方式面临着响应滞后、

覆盖面有限等现实困境，若想针对性解决问题，有必要引入先进的数字孪生技术。具体而言，数字孪生技术的应用，可以有机结合实体仪表数据与对应的虚拟模型，通过实时且持续化的评估仪表工作状态，能够第一时间发现潜在故障征兆并立即启动预警机制，目的是为相关仪器和装置的正常运行提供可靠保障。举例说明，在乙烯裂解装置中，在线分析仪可以实时检测氢气、甲烷、乙烯等关键组分含量。数字孪生系统可以通过对比实时数据与历史工况下的数据差异，快速判断是否存在问题。一旦发现仪表故障，系统会立即启动自动报警并利用先进的数字孪生技术分析计算相关炼油化工数据，同时，基于标准差与测量误差等参数分析贡献度，以此来精准定位故障源，为维修人员提供明确的处置指引，有效避免因仪表失效可能引发的一系列连锁反应，在有效消除仪表故障的同时确保装置安全、稳定且长周期地运行^[7]。

（三）数字孪生：装置优化控制

数字孪生技术在装置控制、优化中的应用并不是一蹴而就的，而是一个动态化、持续迭代的过程。此过程的核心目标为构建高保真的虚拟模型，以此来完美映射物理实体的实时运行状态。如此，能够畅通物理实体与虚拟模型之间的数据交互通道，继而建立协同融合、虚实结合的共生关系。数字孪生系统可以实时感知外部市场波动与内部装置状态变化并根据实际情况作出动态响应，形成自主决策，最终实现动态优化、控制生产装置的目的。以乙烯裂解炉优化和控制为例，数字孪生系统第一步需要采集数据、分析运行工况、估计工艺参数并整定数据，以此来完成对裂解炉虚拟模型的求解计算。在计算完成后，系统会自动输出数据并生成分析报告。整个过程具有极强的自主性和智能性^[8]。不仅如此，虚拟模型还会根据实际工况条件自主控制操作的各个环节并根据不同环节的数据反馈动态调整输出策略。模型则通常会按照预设的时间间隔循环执行优化任务并将最终的计算结果持续向物理实体中的 APC 传递，以此来增强系统的自主能动性，形成一个完整闭环。

三、数字孪生技术在石油化工企业数字化转型中应用的思考与展望

（一）5G 赋能数据采集、传输

正如上文提到的，数据采集与传输应保证稳定性与高速性，这是应用数字孪生技术的根本保障。石油化工企业的流程复杂且测点繁多。尤其在智能制造时代，企业对自动化程度提出了更高要求。因而，有必要建立一条高速、稳定且精准的数据通道。5G 与工业互联网的深度融合，最大的优势就是能深度集成企业内部的信息流、指令流与操作流，通过远程在线监控并精准操作各个环节，为数字孪生技术在企业中的应用提供实时且可靠的数据支撑，实现技术的高效应用。更进一步地来讲，5G 技术的应用有望突破企业间、区域间乃至国家间的壁垒，通过全面汇聚全社会的生产资源、生产过程、生产能力等各方面信息，促进海量数据的汇聚共享，为石油化工企业生产运行模式的持续优化与快速迭代提供科学的数据依据，使企业整体经济效益最大化^[9]。

值得一提的是，数字孪生技术的快速发展可能会引发一系列网络安全问题，究其原因，可能在于数字孪生技术的引入让原本封闭的系统变得更开放，加上网络连接趋于简单化，这可能会进一步加剧网络安全问题。为了有效避免安全风险，石油化工企业可以同步构建数字孪生网络安全保障体系，确保数据从采集到传输过程的安全性，这是未来石油化工企业在应用数字孪生技术和5G技术需要认真思考的问题之一。

（二）智能驱动信息处理分析

石油化工企业采用的传统信息处理方法可能存在效率低下、精准度不足等显著问题，这在无形中可能会制约数字孪生技术在石油化工企业中的应用与推广，使企业在信息处理方面面临严峻的挑战。在此背景下，石油化工企业可以将云计算、大数据、区块链、人工智能等新兴技术应用于企业的信息处理分析过程，这能为数字孪生的数据处理、系统建模以及仿真分析提供强大的技术支撑与崭新的技术路径^[10]。然而，如何才能高效地应用这些技术，提升数字孪生信息处理的质量和效率，该问题同样有待于石油化工企业思考并探索。

（三）标准引领体系构建完善

截至目前，我国尚未构建统一的数字孪生标准体系，这对数字孪生技术在石油化工行业的应用推广可能产生不利影响。因而，相关人员在研究数字孪生技术在石油化工企业应用这一课题的同时应积极与石油化工企业、行业协会、标准化组织等建立密切的合作关系，关键是应联合构建一套适用于石油化工企业的数字孪生标准体系，以此来为行业规范发展以及石油化工企业的可持续发展奠定坚实的基础^[11]。

四、结语

综上所述，数字孪生技术在石油化工企业数字化转型中的应用，对全面提升企业的管理水平以及提高生产效率具有重要的现实意义。尽管如此，数字孪生技术的应用还存在亟待解决的一系列问题。因而，未来，石油化工企业仍应积极探索并应用先进的数智化技术，如此，才能在激烈的市场竞争中立于不败之地，更好地满足市场需求。

参考文献

- [1] 刘志鹏, 赵毅. 数字孪生技术在石油化工企业数字化转型中的应用研究 [J]. 石油化工自动化, 2022, 58(5): 1-6.
- [2] 杨亮. 数字孪生技术在化工企业数字化管网建设上的应用 [J]. 石化技术, 2024, 31(11): 208-210, 182.
- [3] 叶光莉. 石油化工安全生产中的数字孪生技术 [J]. 石化技术, 2025, 32(3): 90-92.
- [4] 谭红星, 蒋白桦, 陈浩, 等. 基于 AI 驱动的数字孪生技术在石油化工智能装置中的应用研究 [J]. 人工智能, 2025(2): 35-42.
- [5] 陈岳飞, 肖珍芳, 方向. 数字孪生技术及其在石油化工行业的应用 [J]. 天然气化工 (C1 化学与化工), 2021, 46(2): 25-30.
- [6] 刁俊武, 田壮, 论国柱. 数字孪生技术在石油化工行业的应用研究 [J]. 石化技术, 2022, 29(7): 79-82.
- [7] 李全. 数字孪生技术在石油化工安全生产的应用现状及挑战 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(2): 34-36.
- [8] 姚速. 数字孪生技术运用到石油化工企业数字化转型中的思考 [J]. 中国战略新兴产业, 2024(2): 33-35.
- [9] 张霞. 数字孪生标准体系在石油化工行业的构建 [J]. 科海故事博览, 2021(12): 34-35.
- [10] 万华. 基于数字孪生的石化工业互联网综合解决方案 —— 石油和化工工业互联网平台 ProMACE 创新应用 [C]//2020 年工业互联网大会论文集. 2020: 1-16.
- [11] 罗浩. 数字孪生技术在化工园区安全管理中应用 [J]. 中国宽带, 2023, 19(11): 130-132.