

# 智能制造背景下化工过程数字孪生系统构建 与实时优化控制经济性分析

郑岚英 孙志国 宋义银（山东祥瑞药业有限公司，山东 泰安 271509）

**摘要：**在智能制造时代背景下，数字孪生技术成为虚实融合与认知增强的关键支撑。基于化工过程复杂耦合与动态不确定性的特征，为其提供一种新的智能化和自主优化的新范式，构建了融合机理模型与数据驱动模型的数字孪生体系架构，探讨多源异构数据的实时交互机制、优化控制策略和应用经济性分析。通过加入模型预测算法与智能决策算法实现对化工过程中进行精准建模、实时监控及自适应优化控制，为企业经济发展打造坚实基础。

**关键词：**数字孪生；智能制造；化工过程；优化控制；经济效益

中图分类号：TQ021.8 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)033-0079-03

## Economic Analysis of Construction and Real-time Optimization Control of Digital Twin System for Chemical Processes under the Background of Intelligent Manufacturing

Zheng Lanying, Sun Zhiguo, Song Yiyin (Shandong Xiangrui Pharmaceutical Co., LTD., Tai'an Shandong 271509, China)

**Abstract:** Against the backdrop of the era of intelligent manufacturing, digital twin technology has become a key support for the integration of the virtual and the real as well as cognitive enhancement. Based on the complex coupling and dynamic uncertainty characteristics of chemical processes, a new intelligent and autonomous optimization paradigm is provided for them. A digital twin architecture integrating mechanism models and data-driven models is constructed to explore the real-time interaction mechanism of multi-source heterogeneous data, optimization control strategies, and application economic analysis. By incorporating model prediction algorithms and intelligent decision-making algorithms, precise modeling, real-time monitoring and adaptive optimization control of the chemical process can be achieved, laying a solid foundation for the economic development of enterprises.

**Key words:** Digital Twin; Intelligent manufacturing; Chemical engineering process; Optimized control; Economic benefits

随着信息技术的迅猛发展以及全球工业4.0时代的来临，智能制造与数字孪生技术正逐渐成为推动制造业转型升级的核心力量<sup>[1]</sup>。化工行业属于流程工业的重要组成，生产环节包含高温高压、强耦合及高风险的特性，对于实时监控与优化控制有着极高要求。数字孪生技术借助生成物理对象的虚拟镜像，实现虚实对应、及时互动以及协同改善，在化工进程智能经营和掌握方面起着关键性的支撑。

### 1 智能制造背景下数字孪生系统概念

#### 1.1 智能制造概念

智能制造是新一代信息通信技术与先进制造技术深度融合的产物，制造业正在发生从“自动化”向“自主化”，从“经验驱动”向“数据和知识驱动”的范式转变。它的主要含义是依靠物联网、大数据、云计算、人工智能以及数字孪生技术，实现对制造资源的全面互联及动态感知<sup>[2]</sup>。打造围绕产品全生命周期的数字化体系，智能制造可以从设计、生产、运维到服务全

流程进行智能化决策，并且做到系统在复杂环境下的自主适应性优化。

#### 1.2 数字孪生概念

数字孪生是物理实体在虚拟空间的高保真镜像，它把机理建模、多源异构数据和智能算法融合起来，打造全方位覆盖设计生产运维全生命周期的动态模拟复制品<sup>[3]</sup>。依靠传感和通信技术实现实时虚实交互，并借助模型为主导的数据闭环来实现系统自适应演化和自优化。从结构上看，数字孪生包括物理对象、虚拟孪生、连接、孪生数据和服务等五个方面构成，可应用于原型验证过程到实例运行阶段直至进行聚合分析，在智能制造复杂的体系下对系统的精准建模、虚实协同以及决策优化提供理论依据和技术保障。

### 2 智能制造背景下化工过程数字孪生系统构建

#### 2.1 化工过程建模与数据采集

由于化工生产过程往往具备高非线性、多变量耦合及时变特征等特性，导致传统的单机理模型或者纯

数据驱动模型无法全面体现系统的动态表现情况，所以在整个流程里需形成多种尺度和物理场相互影响的数学模型系统，包含传热传质现象、化学反应动力学机制及流体力学等多个重要环节。在此基础上，通过分布式传感器网络去收集温度、压力、流量乃至浓度这些主要数值变量信息内容，实现对实际物体状态即时掌握的目的。数据收集不只是过程变量，还要包括设备状况、环境条件以及操作历史资料，在这些内容上形成多源异构的数据集合体，收集来的数据经过清洗之后需要加以融合并进行时间上的同步处理，这样才能保证数字孪生模型的精准度与信赖度得以提升。

## 2.2 物理模型与数据驱动模型融合方法

化工过程具有复杂性，单一建模存在局限性，机理模型和数据驱动模型融合应用兼有物理规律以及经验数据的优点，形成更为精准的数字孪生体。机理模型用质量守恒、能量守恒及反应动力学方程描述了过程本身特性，但在处理非线性耦合问题时难免会有误差出现。基于数据驱动的深度神经网络（DNN）、长短期记忆网络（LSTM）或高斯过程回归（GPR）模型被引入来弥补机理模型缺陷，以实现对非线性动态行为的有效预测<sup>[4]</sup>。融合的方式可以采取灰色箱模型或者残差建模方式，将机理模拟结果作为机器学习模型的初值或者参照值进行在线修正模型参数，以得到一个虚拟实体自适应的结果。

## 2.3 数字孪生系统架构设计

打造化工过程数字孪生系统，须要规划出层次清晰且功能完整的体系架构，以支撑物理实体同虚拟模型展开深层次的互动并做到协同改良。系统架构通常包含数据层、模型层、控制层和服务层，其中的数据层要担负起采集并传输信息的任务，还需清洗这些来自各种传感器以及实验还有历史数据库里的多源数据，并把它们储存起来；而模型层则会整合机理模型和数据驱动模型这两方面的技术力量，进而做到对物理过程精确仿真，并做出状态预测。控制层会依靠MP智能化的算法，实现过程参数的实时优化与闭环调节；服务层面的功能实现上可以提供可视化决策辅助机制与具有预知性质维护策略的支持内容，并发出异常报警提示，以此实现面向管理者和操作人员交互的目的。整个设计在模块性方面强调可增加扩充且具备实时性的特点，同时还要满足云边联合使用的安全条件，实现化工生产高度可靠的专业化需求，并保证在变动的环境下维持稳定运行。

## 2.4 系统集成与平台搭建

数字孪生系统落地之时，系统集成和平台搭建是虚实协同与应用落地的关键环节。该平台须兼容各种

传感器接口、控制系统（如 DCS、PLC）以及数据库，并完成数据的有效采集、传输与处理。需构建虚拟仿真环境，将机理模型与数据驱动模型嵌入进此环境当中，进而做到对物理过程的即时仿真及预估。在系统集成期间，应采用标准通讯协议和模块化的软件架构，以确保各子系统之间的互动性及可扩充性能。在硬件部署方面，则可以通过边缘运算节点来执行部分的数据加工操作与即刻控制，云端平台则实施大数据剖析及改进。此平台不但提供即时监督、异常诊治及预见修理之类的功用，而且还支持生产改良、试验复核以及决定模仿等事务，从而向操作员和经营人员给予全方位又多层次的知识智能化服务。

## 3 智能制造背景下化工过程数字孪生系统的实时优化控制

### 3.1 实时数据交互与同步机制

化工生产环节往往牵涉到反应釜、换热器以及蒸馏塔的诸多单元持续或者间歇式运作，每个单独的单元自身所处的热力学状况、传质特性及化学反应速率都存在着相当复杂的非线性交互关系。数字孪生模型想要达到准确度的目的，就需要形成多层次的数据收集与传送网络结构系统，依靠传感器获取诸如温度、压力、浓度、流速还有物料属性的重要参数，并且通过实施时间同步及数据融合类算法来对这些多元异构性质的信息加以处理，从而剔除其延迟与噪声干扰。基于此，通过高速通信协议和边缘计算节点，来实现物理实体同虚拟实体在秒级甚至亚秒级别的数据同步，让虚拟模型能够及时体现出现实过程当下的状态。

### 3.2 过程优化控制算法设计

化工过程优化控制需综合考量反应动力学、传热传质以及多变量耦合特性，于是数字化过程中要使过程优化控制算法具有预测性、自适应性和鲁棒性。MPC 可通过数字孪生预估未来状态并对约束下的最优问题予以求解，从而完成温度、压力和组分浓度的动态调整，以达到其选择性的目标。在复杂的反应体系，诸如多个连续步骤或者并行副反应体系之中，由于存在非线性动力学且反应速率会受到温度与浓度耦合的影响而变化时，则需要将化学动力学方程式同数据驱动模型结合在一起进行处理。强化学习 RL 等智能优化算法可在数字孪生仿真实验环境里，反复训练出最佳策略以应对环境干扰以及设备老化造成的动态改变状况。通过对多单元连续装置开展协同优化，进而实现全流程能耗降至最低目标并实现产率最大化，并给化工生产带来十分精准且及时的改善。

### 3.3 预测性维护与异常检测

数字孪生系统在设备振动、温度、压力、化学介

质属性等参数持续监控下，借助物理模型与数据驱动残差的分析方式，可预知有可能引发反应误差或设备故障的安全隐患风险。在催化反应器中就存在这样的情况：对催化剂活性程度及其传递热量效能的变化加以观察时，就能推断出选择性下降趋向，从而尽早安排进行相应的保养或者替换事宜。基于机器学习的异常检测算法可以用于处理复杂的、多维的时间序列的数据，并能捕捉到非高斯或不寻常的变化，在考虑到反应动力学和热质平衡等特性的基础上，实现对系统存在非线性扰动及突发故障等问题的敏感感知。

### 3.4 实时决策支持与反馈控制

数字孪生系统把仿真预测、优化控制同实时数据形成闭环结合起来，从而做到对化工流程的决策支撑与回馈调控<sup>[5]</sup>。它按照当前运作状况以及将来情形推测，给出最恰当的操作建议，包含怎样改变反应温度、物料加入速度和搅打速率等等，并且经过反馈回路直接作用到控制器上，让过程参数实现自动适应性调节。在连续蒸馏、液相聚合这种较为复杂的工业工艺里，持续性的决策辅助绝非只看热力稳定性和动力学限制，还需要考虑到安全性限定和能源耗费最低化这些因素，并针对发生的偏差或者扰动立即予以修正。数字孪生平台靠可视化的手段表现这些预测结果、操控办法还有潜在危险，使操作员理解并执行决策，支持闭环自动控制，实现单元至全流程优化的统一管理。

## 4 智能制造背景下化工过程数字孪生系统的融合应用经济性分析

### 4.1 数字孪生驱动的智能决策与经济效益提高

数字孪生系统通过把机理模型同数据驱动模型结合起来，能在生产过程里做精确的预测并实施动态更新，同时对工艺参数随时作出调整，优化产品质量的稳定程度，缩减原料的浪费情况以及能源消耗情形。例如，在连续蒸馏装置上采用数字孪生系统来改善温度和压力操控，单批产品的产出大约上升 3.5%，能量耗费削减约 4%，并且让副产品产量下降到 2.8%。智能化决策机制通过持续对生产全流程进行监督调节，使得生产中所有资源的使用效率都有显著提升，从而实现经济效益的提高，为企业在激烈的市场竞争中提供经济与技术的双重支撑。

### 4.2 远程监控与故障诊断带来的成本节约

数字孪生系统能完成对设备状态的远距离监控并预估异常情况，在故障出现之前就做好预防性修理工作，削减设备停止工作的时刻和修复费用。如在催化反应器运作过程中，基于残差分析与机器异常的检测方法，可提前预测并干预，有效避免设备意外停机的损失，削减因紧急修理造成的材料和人力开销。远程

监控与故障诊断的结合，使得生产的安全性、稳定性都得到了提升，并且为企业节约了运营成本，证明数字化管理对经济效益有着直接贡献。

### 4.3 生产环境模拟与优化带来的经济性提升

在虚拟仿真环境下，复杂工艺流程的多方案优化可不受实际生产影响。通过对不同操作条件、原料组合以及设备参数进行模拟分析，可以得到能耗最低、产率最高的生产方式，并给决策者提供参考依据，降低生产的失败概率。在某化工多单元连续装置案例中，仿真实验表明，通过改变反应器温度曲线和回流比，使总体能耗减少 5%、产量增长 4.2%，而成本则随之降低约 3.8%，同时也避免了因为尝试错误所导致的其他额外耗费以及停机损失。生产环境模拟不但缩短了工艺改进周期，而且减小了试错成本，让企业在投资决策、安排生产和分配资源方面更为节省资金，并且给企业的长时期生产改善及可持续发展给予了数据支撑和技术保证。

## 5 结语

智能制造环境下，化工过程数字孪生系统通过虚实深度关联，达成对庞大繁杂动力学、耦合非线性和整个生命阶段行为的精确感知、预估与改进，为流程产业高效运作、智能决策和持续发展上赋予了理论根基和技术途径。

### 参考文献：

- [1] 姚立权, 刘永刚, 李文化. 基于数字孪生的智能制造教学试验实训平台开发 [J]. 机电工程技术, 2024, 53(07):133-136.
- [2] 丁玉林. 智能制造在化工企业电气设备中的应用与发展前景 [J]. 化工管理, 2024(30):92-95+108.
- [3] 高洋. 以智能制造为导向的数字孪生工厂构建方法与应用 [J]. 信息与电脑(理论版), 2024, 36(12):92-94+98.
- [4] 段君艳, 辛社党, 崔明光, 等. 含能材料智能制造生产线本质安全设计及数字孪生技术应用 [J]. 锻压装备与制造技术, 2025, 60(04):11-18.
- [5] 叶军. 重卡行业数字化与智能制造的技术及策略 [J]. 汽车电器, 2025(09):134-136.

### 作者简介：

郑岚英 (1979-)，女，汉族，山东泰安东平人，本科，工程师，研究方向：化工安全。  
孙志国 (1988-)，男，汉族，山东泰安东平人，本科，工程师，研究方向：化工安全。  
宋义银 (1976-)，男，汉族，山东泰安东平人，本科，高级职称，研究方向：化工安全。