

基于数字孪生技术的化工自动化实训基地三位一体建设路径*

李 智¹, 刘莹英^{2, **}

(1. 武汉软件工程职业学院, 湖北 武汉 430205; 2. 武汉商学院, 湖北 武汉 430056)

1 建设背景与意义

随着工业 4.0 与智能制造技术的迭代升级, 数字孪生技术逐步成为化工自动化领域的关键支撑技术。该技术通过建立物理实体与虚拟模型间的双向数据交互机制, 再结合人工智能算法及大数据分析手段, 可精准模拟化工生产流程中的工艺优化、故障预判与能耗调控等核心环节, 进而可以构建具有动态响应、高拟真度的化工实训教学环境。因此, 依托数字孪生技术构建新型实训基地, 不仅能够突破传统教学场景的物理限制, 还能通过虚实联动的教学模式, 提升学生应对复杂工况的实践能力和创新思维, 为化工行业输送具备技术适应性与前瞻视野的高素质人才。

2 化工自动化实训基地需求分析

2.1 化工行业发展需求

化工产业作为国民经济的重要支柱之一, 其市场规模呈现稳步扩张态势, 年度增幅维持平稳区间。生产自动化系统的引入使得化工流程中的关键参数采集、信号传输、信息处理及结果分析均能自主完成。这种技术革新不仅优化了产线效能与制品品质, 更显著降低了人员介入频次, 规避了人为操作偏差, 有力地保障生产安全体系运行, 为行业持续成长构筑技术支撑。当前阶段, 人工智能算法、海量数据分析、智能物联等技术的迭代升级, 促使自动化解决方案正渗透至更多工艺环节, 为行业转型升级开辟多元技术路径。因此, 基于数字孪生技术的化工自动化实训基地成为了自动化技术在化工领域的技术验证和应用模拟的必要平台。

2.2 化工自动化人才培养需求

面对未来 5 年行业发展窗口期, 技术人才将直面多维度复合挑战, 岗位胜任力标准呈现精细化与专业化并重特征。聚焦能力建构维度, 从业人员亟需兼备化学工程学科知识体系与智能控制技术实践能力, 具体包含依托数字孪生架构的碳排建模与工艺调优能力、融合人工智能的装备状态预判与智能维保技术、基于工业数据流的产线优化决策方法。这类高阶能力的塑造既需要系统化的知识积淀, 更依赖产教融合的实践载体。这恰印证了集成数字孪生技术的实训平台在人才培养链路中的战略地位与实施价值。

3 实训基地建设目标与任务

虚实映射平台的搭建构成实训基地建设的中枢工程。作为新型工业建模范式, 该技术通过构建物理装备的数字孪生镜像体, 打通实体空间与虚拟空间的交互通道。通过解构基于典型化工单元操作的工艺流程, 建立高保真工艺映

射模型, 实现多维度教学情境的快速适配, 满足差异化的实训目标需求。

教学资源体系重构是实训基地的功能性支撑要件。针对智能化岗位能力矩阵, 并融合数字孪生技术特征, 系统化地构建虚实融合课程体系。内容覆盖过程控制原理、智能仪表操作等核心知识和技能, 着力培养学生的工程思维与实践创新能力。

双师型团队培育是实训基地建设的战略性支撑环节。实训基地将作为能力提升载体, 通过“技术能力+教学实施+产教融合”三方协同的培养机制推进教学团队专业化建设。

4 实训基地建设路径

4.1 架构设计

实训基地的虚实映射架构由物理层、数据层、模型层、应用层构成。

物理层集成智能传感器、边缘计算设备及绿色化工装置, 模拟真实的化工生产场景。通过部署支持 OPC UA 协议的工业传感器, 搭配 NVIDIA Jetson 系列边缘计算设备, 实现数据本地化预处理(如噪声滤波、异常检测), 降低云端传输延迟。这些设备通过工业网络与数据采集系统连接, 将实时数据传输到数据层。

数据层负责采集、存储和处理物理层传来的实时数据, 包括数据采集系统、数据库管理系统等。数据采集系统采用工业物联网技术, 实现对各种设备数据的高效采集。数据库管理系统用于存储历史数据和实时数据, 为数字孪生模型提供数据支持。同时, 采用时序数据库(如 InfluxDB)与区块链技术, 保障数据安全与可追溯性。

模型层涵盖三维实体模型、机理模型、运行特征模型三类数字映射体系。三维实体模型精确复现设备拓扑结构; 机理模型解析传质传热等化工过程本质规律; 运行特征模型动态刻画设备工况迁移特性。该层通过数据层获取实时工况流, 并植入时序预测算法实现模型自演进, 为决策优化提供动态仿真沙盘。

应用层集成虚实融合训练平台, 包含四大核心模块: 智慧教培系统(在线实训、智能考评、知识图谱导航)、工艺推演系统(动态仿真、操作预演)、设备健康管理系统(故障模式识别、剩余寿命预测)、智能优化系统(工艺参数自整定、能效闭环调控)。各模块通过 API 网关实现服务化调用, 支持微服务架构弹性扩展。

4.2 数字孪生平台建设

依托数字孪生技术, 构建与物理产线高度映射的虚拟

* 2023 年度湖北省高等教育学会科学研究课题(2023XB057)

** 通信作者: 刘莹英, 女, 1984 年生, 博士, 副教授, 主要从事教育与教学研究。

作者简介: 李智, 男, 1980 年生, 硕士, 讲师, 主要从事智能控制技术研究。

工程环境,实现化工生产过程的虚实融合。该技术平台由四大核心组件构成:数字映射引擎、过程模拟系统、控制逻辑开发环境、数据治理平台。具体如下:1)部署具备多物理场建模能力的数字映射引擎,调用其三维拓扑重构、工业数据融合、多尺度仿真、故障模式注入等功能模块,选择典型化工单元操作(如催化裂化、萃取分离、流体输送),建立包含反应器群组、分离塔器阵列、管廊系统的全要素工艺数字镜像,精确还原设备几何构型与空间拓扑关系。2)集成专业级化工过程模拟系统,为虚拟装置注入热力学参数与传递过程属性,开展流程工业的物质转化与能量迁移动态仿真,使学员能够直观观测工艺参数扰动对产品质量与能效指标的影响规律。3)配置工业控制逻辑开发环境,如利用 STEP 7/TIA Portal 软件搭建与数字孪生工艺模型深度耦合的虚实联调平台,涵盖集散控制系统、人机界面、PLC 程序仿真器等工业控制系统要素。学生可在虚拟工程空间实施控制回路组态、调节算法验证、联锁逻辑调试等实训项目,还可定量分析 PID 参数整定对过程稳定性的作用机理。4)构建工业大数据治理体系,借助时序数据库集群与数据血缘追踪技术,实现生产过程数据流与虚拟模型数据湖的协同管理。通过设置典型设备故障场景,引导学员结合工艺参数异常波动特征,运用故障树分析法进行缺陷定位与处置方案推演,系统培养其工程问题诊断与应急处置的核心职业能力。

4.3 教学资源建设

在教材内容优化方面,需要系统性整合基础理论知识。化工自动化专业的相关教材既要完整呈现化工原理、仪表自动化、控制理论等核心知识模块,还应增设数字孪生技术专题模块,重点阐释其技术原理、系统架构以及在化工智能化转型中的具体应用场景。这种知识体系的有机融合,既能强化学生对传统工艺的理解,又能培养其对新兴技术的敏感度。

在实践教学资源建设层面,将采取“虚实结合”的案例开发策略。通过收集典型化工装置的孪生模型数据,编制包含不同难度梯度的实训项目手册。每个实训单元需明确能力培养目标,设置涵盖工艺参数设定、设备操作规范、异常工况处置等环节的实践任务。通过真实项目驱动,帮助学生建立理论迁移应用的思维路径。

在教学实施环节,将构建“云端+线下”的混合式实训平台。依托现有网络基础设施,搭建集成虚拟仿真系统、三维可视化教材、微课视频资源的数字化学习空间。平台需建立分类检索机制,支持学生按工艺类型、技能等级等维度自主选择学习内容。教师团队可动态更新企业真实生产数据包,定期发布基于工业现场的“在线预演-线下实操”复合型实训任务,确保教学内容与行业发展保持同步迭代。

4.4 师资队伍建设

基于数字孪生技术的师资团队建设呈现出显著差异化的实施路径,核心特征在于突破学科边界的团队构建模式——通过组建涵盖化学工程、智能控制、信息技术三大领域的复合型教研团队,形成“化工+人工智能+信息技术”三位一体的教学共同体。为提升教师数字素养,还将实施

双轨制能力提升计划。一方面开展虚拟仿真教学能力专项研修,培训内容包括人机交互界面操作、动态场景构建、多维度评价系统设置等实操模块,重点培养教师将工艺知识与虚拟现实技术有机融合的教学设计能力。另一方面推行项目化教学改革,要求教师团队开发基于典型工业场景,每个案例需包含工艺背景分析、数字模型参数配置、异常工况处置演练等教学环节。通过“技术赋能+教法创新”的复合培养模式,促使教师形成虚实结合的新型教学能力体系,从而能更高效地培养学生解决复杂工程问题的实践能力。

5 创新应用与实施路径

5.1 虚实融合实训场景

在实践教学创新层面,数字孪生技术构建了三维数字映射空间,实现生产装置的全要素动态复现。典型应用包含三大核心场景:工艺参数优化、设备故障诊断、安全应急训练。例如,学生可借助高精度数字孪生体对乙烯裂解装置进行全流程仿真建模,通过机器学习算法迭代计算最优能耗参数组合,并将预测模型导入实体集散控制系统系统进行验证测试;在设备故障诊断场景中,整合企业历史运维数据,设计包含信号特征提取、故障树分析、维修方案制定的全链路训练模块;安全应急训练则依托 Unreal Engine 软件开发高沉浸式虚拟环境,模拟有毒气体泄漏扩散模型及反应釜超压爆炸过程,结合眼动追踪技术与触觉反馈系统,实现应急处置决策能力的三维可视化评估。这种虚实融合训练模式突破传统实训物理约束,既保障高危操作零风险演练,又通过多模态感知交互达成操作肌肉记忆培养,显著提升学生工程实践能力。

5.2 产教融合技术反哺

从技术反哺角度,数字孪生实训基地构建了产学研用一体化创新载体。科研人员可基于动态仿真模型开展多目标优化实验,如教研团队可以在虚拟化协同平台构建分布式数字工厂,通过数字分身技术实现跨地域协同作业,完整再现工艺包设计、控制系统组态、生产效能评估等环节,并将实验数据实时同步至网络进行可信存证。在校企合作方面,通过实施“镜像工厂”计划,将化学智能工厂的 PI 系统数据流映射至元宇宙空间,师生则可通过头显参与设备健康度评估与工艺参数调优,再将形成的优化方案经 OPC UA 协议反向传输至实体装置,构建“虚拟迭代-实体验证”的闭环优化体系,实现工业元宇宙共建。

6 总结

基于数字孪生技术的化工自动化实训基地建设路径为破解传统实训模式“高投入、低迭代、弱适配”的痛点提供了创新解决方案。通过“物理—虚拟”双向映射技术架构的搭建,实训基地实现了化工生产全流程的动态仿真与智能优化,在降低教学成本与安全风险的同时,显著提升了学生的复杂工况应对能力与技术创新意识。“平台+资源+师资”三位一体建设框架,不仅突破了学科壁垒,更通过产教融合机制实现了技术反哺与教学改革的深度协同。通过持续推动技术创新与教育模式的深度融合,真正培育出契合“智能制造+绿色化工”的高素质技术人才,为行业转型升级提供坚实支撑。