

工业工程研究生智能制造系统优化能力培养的 “虚实融合”路径研究

岳志春¹, 张晓蕊², 王玉韬¹

(1. 河北工程大学 管理工程与商学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学 科信学院, 河北 邯郸 056038)

[摘要]随着智能制造加速推进,工业工程人才亟需掌握数据驱动优化、虚实协同管控等核心能力,而传统培养模式因实践场景局限、复杂系统训练不足,难以满足上述需求。文章聚焦于“虚实融合”教学路径,首先,解析智能制造系统优化能力的核心维度(系统建模、多目标决策、动态调度),结合数字孪生、AR/VR等技术特性,构建“认知—实践—反馈”三阶段培养模型;其次,设计虚实互补的实践路径,涵盖课程重构(虚拟仿真与物理实验映射)、平台建设(数据—仿真—应用三层架构)及动态评价体系;最后,通过对“虚实融合”培养路径实施成效与机制分析,进一步明确了此路径在提升工业工程研究生智能制造系统优化能力方面的重要作用。研究证实,“虚实融合”路径通过数字孪生的动态反馈机制,可有效弥合理论教学与工业实践的鸿沟,为智能制造人才培养提供可复用的方法论支撑。

[关键词]工业工程;智能制造;虚实融合;数字孪生;系统优化

doi:10.3969/j.issn.1673-9477.2026.01.015

[中图分类号]G642.0

[文献标识码]A

[文章编号]1673-9477(2026)01-0112-07

随着全球制造业向智能制造转型,数字孪生与工业物联网技术驱动生产系统向数据驱动优化与虚实协同管控方向演进。最新研究表明,这两项技术通过构建虚实动态交互框架,对研究生培养提出了系统性变革需求——在传统方法论基础上,亟需强化系统建模、多目标动态调度和人机智能协同等复合型能力。^[1]当前工业工程人才培养模式面临三重结构性矛盾:首先,传统物理实验因成本与安全限制,难以支撑柔性产线与供应链网络等复杂系统的动态优化研究;^[2]其次,现有课程体系偏重算法理论推导,缺乏虚实交互验证与迭代优化的全流程训练,导致学生工程实践能力断层;^[3]最后,数字孪生与AR/VR技术应用仍多停留于技术演示阶段,尚未形成贯穿系统优化全生命周期的深度整合。^[4]

针对这些关键问题,本文创新性地提出了“认知—实践—反馈”三维联动的虚实融合培养模型,其核心突破体现在三大维度:在技术维度上,通过数字孪生概念模型与VR/AR系统的深度耦合,构建动态协同的跨平台数据交互训练体系;^[5]在教学维度上,突破传统线性教学结构,构建具有闭环反馈机制的

虚实融合实践平台,显著提升复杂系统优化能力;在学科维度上,基于虚拟孪生跨学科设计理念,重点培育面向智能制造的多目标决策与人机协同创新能力。^[6]尽管虚实融合技术展现出显著的教育赋能价值,但其技术可靠性保障机制与实时交互效能仍存在优化空间。本文通过系统解析培养路径的作用机制与实施成效,为工业工程教育从工具化应用向生态化体系转型提供新的理论框架与实践路径,对智能制造时代的高端人才培养具有范式革新意义。

一、“虚实融合”路径的理论基础及理论框架

(一) 理论基础

虚实融合的理论基础建立在跨学科知识整合与系统性框架设计之上,其核心逻辑聚焦于物理空间与数字空间的动态耦合与协同演化。信息科学通过数字孪生机制构建实体与模型的实时映射关系,形成虚实数据交互的基础架构,而扩展现实(XR)技术谱系则为多模态感知融合提供了技术实现路径;复杂系统视角下,非线性协同效应理论解释了虚实系统交互中涌现的不可预测行为,社会技术共生理论

[投稿日期]2025-03-28

[基金项目]河北省高等教育教学改革研究与实践项目(编号:2025GJJG632、2025GJJG633);河北省高校创新创业教育教学改革研究与实践项目(编号:2025cxxy356)

[作者简介]岳志春(1971—),男,河北曲周人,硕士,教授,研究方向:技术创新管理、区域发展管理。

二、智能制造系统优化能力培养的“虚实融合”路径设计

针对工业工程研究生的能力培养,制造业智能化转型的全球趋势对复合型人才提出了多学科交叉要求,传统培养体系中“知识传授—物理验证”的二元割裂模式已无法满足复杂工程系统多目标优化的实践需求。为此,以“虚实融合”为核心方法论,构建覆盖课程重构、平台建设、教学方法革新及校企协同的全链条培养路径,旨在通过虚拟仿真与实体实践的深度交互,实现知识内化、技能强化与创新能力提升的阶梯式培养。

(一)“虚实融合”路径设计的核心原则

“虚实融合”路径的设计需锚定三大原则:一是虚实互补原则,利用虚拟仿真突破物理实验的时空与成本限制,例如通过数字孪生模拟跨地域供应链网络的动态波动,同时借助实体设备识别机械臂精度、传感器响应等现实约束,形成“虚中练决策、实中验真知”的互补闭环;二是案例驱动原则,围绕企业真实痛点设计教学项目,如某汽车零部件企业面临的订单交付延迟问题,将产线历史数据导入虚拟仿真平台,要求学生设计多目标优化方案,确保能力培养与产业需求精准对接;三是动态迭代原则,基于数字孪生实时反馈的产线数据,建立“方案设计—虚拟预演—实体调优”的持续改进机制,例如在智能车间调度项目中,学生需根据实体设备执行反馈,调整算法参数以平衡效率与能耗,从而培养动态适应能力。

(二)“虚实融合”路径设计的支撑体系

“虚实融合”实践平台采用“数据—仿真—应用”三层架构设计。数据层整合企业产线实时数据,构建覆盖20余类工业场景的优化案例库,例如某家电企业注塑车间的能耗数据集、某电子装配线的设备故障日志;仿真层部署数字孪生引擎,支持Unity3D可视化建模与ROS机器人控制算法插件开发,学生可自定义调度规则、能耗模型,并在虚拟环境中测试迭代;应用层搭建虚实联动沙盘平台,实现虚拟方案一键下发至实体设备(如机械臂、AGV),并通过AR眼镜实时监控执行过程。以智能仓储优化项目为例,学生在虚拟环境中设计AGV路径规划算法后,可直接在实体仓库中观察AGV的避障响应与任务执行效率,若出现路径冲突或效率下降,需返回仿真层调整算法逻辑,形成“设计—验证—优化”的闭环训练。

(三)“虚实融合”路径设计的内容载体

课程体系的重构着力于打通“理论—虚拟—实体”三阶能力链接道路。在虚拟仿真课程中,新增“数字孪生与智能优化”相关课程,系统教授Anylogic建模、Python算法开发和OPC-UA协议对接等技术,并且在“生产系统分析”等传统课程中融合虚实映射实验。例如,学生需要先在FlexSim中构建虚拟柔性产线,再通过运用遗传算法优化动态调度方案,最后将参数导入实体PLC控制器中执行,通过计算仿真节拍与实际生产线效率的差值(普遍存在10%—15%的差异),掌握理论模型与实际工业现场的差异。^[10]除此之外,课程体系中还应开发设备故障应急响应以及多品种混流生产的“虚实协同实验包”,为每类场景提供必要的虚拟参数库与实体操作指南,帮助学生实现从单一技能训练到复杂系统问题解决能力的提升。

(四)“虚实融合”路径设计的混合式教学方法

教学方法的创新体现在“MOOC+虚实实验+企业项目”三阶混合式教学法。阶段一(线上)通过MOOC平台教授学生数字孪生基础理论与NSGA-II多目标优化等算法原理;阶段二(虚拟)要求学生在仿真平台完成算法开发与方案预演,例如某团队在虚拟车间中测试了12种调度规则,最终筛选出交货准时率提升18%的Pareto最优解集;阶段三(实体)引入企业委托的真实项目,如某新能源汽车电池产线的能效优化需求,学生需提交可落地的“虚实融合”解决方案,并参与企业验收答辩。为客观评估学生能力提升效果,构建多维动态评价体系:系统建模(30%)、算法创新(25%)、跨平台操作(20%)、团队协作(15%)、文档规范(10%),并利用数字孪生平台自动记录实验过程数据(如调试次数、优化迭代周期),生成可视化的能力成长雷达图,精准定位学生薄弱环节。

(五)“虚实融合”路径设计的双向赋能生态机制

校企协同是“虚实融合”路径落地的重要保障。通过共建“智能制造联合实验室”,企业提供产线数据、设备资源及工程师导师,例如某装备制造企业开放了5条产线的实时数据接口供教学使用;同时,企业定期发布“产业命题”,如某光伏企业提出的“降低硅片切割破损率15%”需求,学生团队需竞标攻关,优胜方案经企业验证后纳入教学案例库。此外,跨学科团队(工业工程+计算机+自动化)联合开发的开源工具包(如基于Python的动态调度算法库)

被10余家中小企业采用,反哺产业升级。这种“教学—产业”双向赋能机制,不仅提升了人才培养的实践价值,更推动了产学研协同创新生态的可持续发展。^[11]

(六)“虚实融合”路径设计的实践验证

以“智能车间调度优化”项目为例,如图2所示,完整呈现“虚实融合”路径的实施逻辑。首先,企业提供某离散制造车间的历史订单数据与设备参数(涵盖10台CNC机床、2条装配线);其次,学生团队

利用数字孪生技术构建虚拟车间模型,识别出焊接工位利用率不足60%的瓶颈问题;随后在虚拟环境中测试改进遗传算法、Q-Learning等多种调度策略,筛选出能使设备利用率提升22%、订单交付延迟率降低18%的优化方案;接着将算法参数导入实体PLC控制器,实际运行中发现机械臂定位误差导致节拍延迟,团队据此调整算法容错阈值,最终实现设备利用率提升17.3%,并通过企业验收。该项目累计迭代优化5次,充分体现“虚实融合”的动态反馈价值。

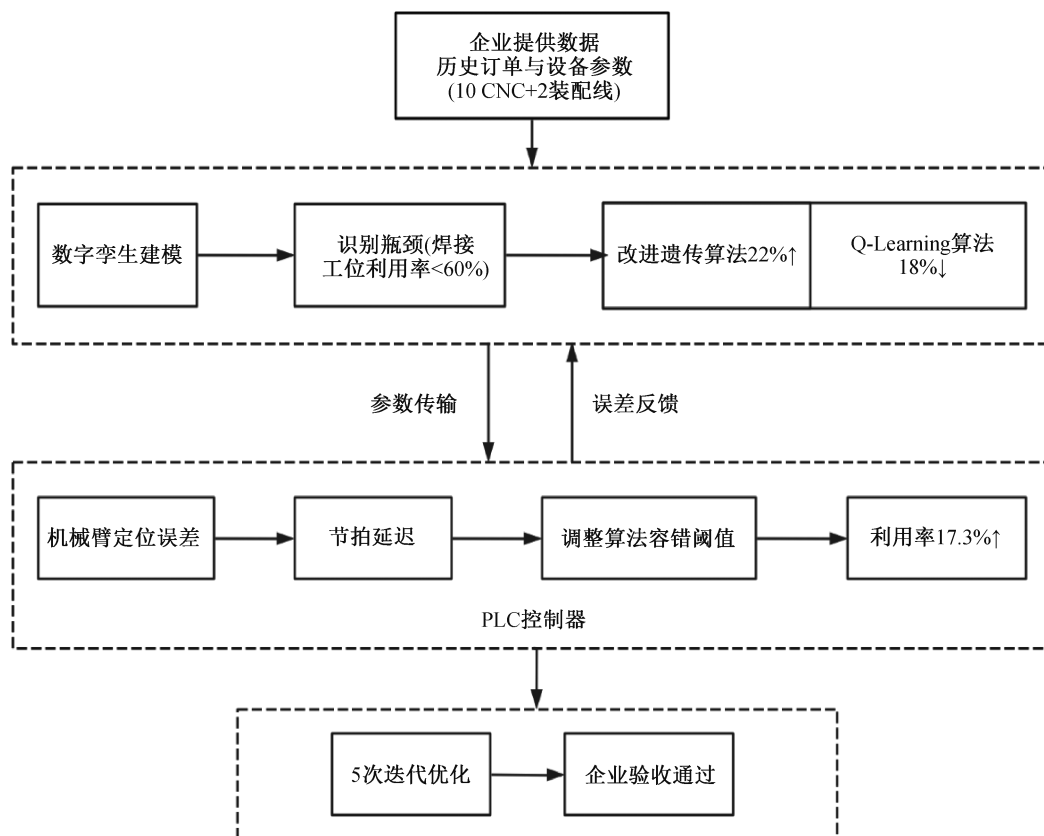


图2 智能车间调度优化“虚实融合”教学项目实施示例

三、智能制造系统优化能力培养的“虚实融合”路径实施机制

“虚实融合”路径的实施机制如图3所示,可通过技术赋能与教育价值转化双维度予以解析。

(一)技术赋能

在技术赋能层面,数字孪生技术的教育价值通过“感知—建模—反馈”的闭环机制重构学习者的认知路径。这一机制的核心在于构建物理系统的动态虚拟映射,并通过虚实交互深化学生对复杂系统的理解。数字孪生技术借助实时数据同步与参数化建模工具,将物理实体(如工业设备、生产线)的运行状

态转化为可交互的数字模型,学生可在仿真环境中进行系统建模与算法验证。以智能制造教学为例,学生在虚拟生产线上设计动态调度方案时,通过调整算法参数(如任务优先级、资源分配策略),能够实时观察多目标优化效果(如订单交付效率、能源消耗变化),并基于模型反馈迭代改进决策逻辑。这种“假设—验证—修正”的交互机制突破了传统实验的时空限制,同时通过虚实数据对比(如仿真预测结果与实际产线运行差异),引导学生探究系统不确定性来源,例如,虚拟模型中未考虑的物理损耗因素(如设备磨损、环境扰动)如何导致预测偏差。在这个过程中,学习者不仅掌握算法应用技能,更通过因果溯源理解模型假设的局限性,进而发展从局部优化到

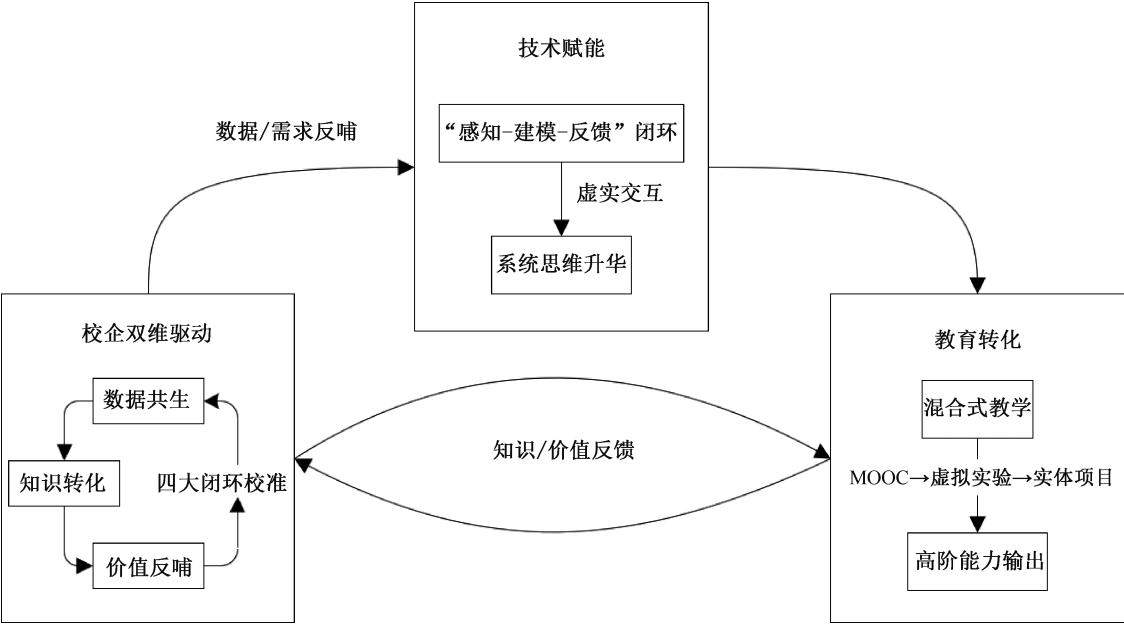


图3 “虚实融合”培养路径的实施机制

系统权衡的工程思维。相较于单向的物理实验,数字孪生技术通过虚实空间的动态耦合,促使学生从单纯算法应用转向系统性因果推理。

(二)教育价值转化

在教育价值转化层面,“虚实融合”路径通过“场景重构—行为反馈—认知升级”的教育逻辑,重塑了工程能力培养范式。混合式教学模式(MOOC+虚拟实验+实体项目)的引入,突破了传统课堂知识单向传递的局限;在线理论学习为虚拟仿真实验提供概念基础,虚拟实验通过多场景模拟(设备故障响应、市场需求波动)创设低风险试错环境,学生在此阶段通过参数调整(如库存阈值设定、PID控制参数优化)观测系统动态响应,完成从知识理解到策略生成的转化;其次,实体项目对接真实产业问题(如产线节拍优化、能耗平衡决策),要求学生在物理约束与不确定性条件下重构在虚拟环境中建立的理想化模型,实现能力在复杂多变工程情境中的有效迁移;最后,实体项目的产业对接进一步将专业技能升华为创新实践能力。这一递进过程契合建构主义学习理论中的“情境—协作—意义建构”框架,证实了“虚实融合”教育在促进学生高阶思维能力发展中的结构性优势。

(三)校企双维驱动机制

在校企双维驱动机制中,“虚实融合”路径通过构建“数据—知识—价值”循环体系,实现了产教融合从表层资源交换向深层能力共进化的转型。^[12]该

机制首先依托数据共生层,将脱敏工业数据(如设备状态时序记录、工艺参数集)经特征工程转化为结构化的教育场景,使虚拟训练环境具备产业级复杂度;其次通过知识转化层建立双向验证通道,学生开发的优化策略须经“产业可行性过滤器”(涵盖技术成熟度、操作兼容性等评估维度)的约束检验,确保教学成果能向产业应用稳健迁移;最终在价值反哺层形成双重反馈路径,显性知识流将算法应用暴露的未建模约束(如设备维护窗口期限限制)转化为教学案例,更新至教学库,隐性经验流则整合产业实践中非技术性挑战(工艺传统惯性、跨部门协作成本)的相关经验,重构能力培养模块。四个动态闭环(数据验证、能力校准、技术演进、生态共建)的协同作用,通过教育系统与产业系统在数据标准、知识形态等层面的互操作性建构,确保“虚实融合”路径能够持续、深入地服务于学生智能制造系统优化能力的培养,并实现其与产业需求的精准对接。

四、研究结论与未来展望

(一)研究结论

“虚实融合”路径通过技术赋能、教育重构与产教协同的深度融合,系统性提升了工程教育质量与产业实践价值。数字孪生技术构建的虚实交互环境突破了传统实验的时空限制,显著降低试错成本,并通过实时反馈机制完善“决策—验证—迭代”的认知闭环,促进学生实现从算法应用到系统性因果推理的能力跃升。混合式教学模式整合在线理论学习、虚拟仿真与实体项目,以多场景试错和产业对接驱

动知识向创新能力的转化,有效培育学生的高阶工程思维与复杂问题解决能力。校企双维驱动机制通过工业数据与教学资源的双向流动,打造产教共生的闭环生态,企业真实场景为教学提供实践基底,学生创新成果反哺产业优化,而产业实践经验又持续反哺教学案例迭代,最终形成教育链与产业链深度耦合的创新范式,推动人才培养与产业需求实现动态适配。

(二) 未来展望

面向智能制造系统的持续优化,“虚实融合”培养路径在前期构建的技术赋能闭环体系、教育价值转化范式及校企双维驱动机制的基础上,展现出强大的生命力和广阔的深化空间,其未来发展应着力于三个关键维度。一是 AI 增强虚实交互机制。深化前期“感知—建模—反馈”的闭环优势,集成生成式人工智能技术,实现仿真场景与复杂故障案例的智能化、自动化生成与动态演化。这将推动自适应虚拟培训范式的成熟,显著提升虚拟环境的逼真度、挑战性与个性化适配能力,使学生能在更贴近真实产业复杂性与不确定性的环境中锤炼优化决策能力。二是工业 5.0 导向的人本化能力框架拓展。将人机协作伦理认知、可持续制造素养深度融入技术优化能力培养体系。利用前期建立的虚实数据对比与反馈机制,在虚拟仿真实验中精准量化评估不同生产调度策略对工人作业负荷、环境影响(如碳足迹)等维度的综合效应,切实驱动“技术效率—人文关怀—生态可持续”多维目标的协同优化与价值共创。三是元宇宙赋能的协同进化新模式。^[13]依托校企双维驱动机制构建的“数据—知识—价值”循环体系与分布式基础设施,探索构建元宇宙赋能的下一代工程教育空间。^[14-15]通过分布式虚拟实验室架构,打造高沉浸感、强交互性的跨地域协作学习环境,支持全球师生及工程师在虚实融合的“数字孪生体”中,实时协同求解复杂工程系统优化难题。^[16-17]这不仅极大拓展了前期“虚实融合”路径突破物理场域限制的边界,更将系统性培育学生面向全球供应链与复杂工程网络的全球化系统思维与协同创新能力。^[18-19]

未来,“虚实融合”路径的规模化应用与持续引领,将依托一个集政策支持、标准共建、资源互通、评价革新于一体的多维协同工程教育改革框架。该框架需充分吸纳并放大前期校企双维驱动机制的闭环效益,确保路径发展始终与产业升级、技术革新和人才需求同频共振,最终实现智能制造系统优化能力

培养的范式性变革与可持续发展。

参考文献

- [1] 林国义,郭慧妍,冷杰武,等.数字孪生在工业工程领域应用的热点和趋势分析[J].工业工程,2024,27(6):13-25.
- [2] 程毅,蒋建军,吕冰,等.虚实深度融合的工程实践教学体系探索[J].高教学刊,2024,10(4):117-121.
- [3] 陶宇炜,谢爱娟,纪梁,等.新工科背景下虚实融合实践教学模式研究[J].常州信息职业技术学院学报,2023,22(1):33-38.
- [4] 张莹莹.基于VR/AR工程图学移动端教学系统开发[D].哈尔滨:哈尔滨商业大学,2024:55.
- [5] 齐天泓,黄海峰,曹乐,等.智能制造数字孪生概念模型与关键技术研究[J].信息技术与标准化,2024(11):45-50.
- [6] 王珊,沈旭昆.面向虚拟孪生的跨学科教学设计与科教融合实践[J].计算机教育,2022(11):1-6.
- [7] 田佳鹭.基于工业互联网的全生产过程信息化管理系统研究[J].物联网技术,2025,15(3):139-142.
- [8] 王凡通,王凌,高雁凤,等.基于改进NSGA-II算法的多AGV多任务分配研究[J].现代电子技术,2024,47(9):157-163.
- [9] 李晋芳,苏键聪,肖立宝,等.工业机器人教学实训平台的AR可视化应用设计[J].实验技术与管理,2024,41(4):118-124.
- [10] 高建雄,袁逸萍,阿地兰木·斯塔洪.基于Flexsim的生产系统建模与仿真实验教学研究[J].中国教育技术装备,2023(14):53-56.
- [11] 李毅.基于校企协同共建的社会工作开放性实验室建设路径探讨[J].现代职业教育,2022(6):73-75.
- [12] 高维,陈圣明,余黎.基于产教融合实训基地的校企协同育人模式研究与实践[J].现代职业教育,2025(1):85-88.
- [13] 宋媛媛.元宇宙视阈下高等教育数字化转型的内涵、困境与路径优化[J].教育理论与实践,2024,44(33):3-8.
- [14] 刘震磊,董传雪,李月月,等.人工智能技术赋能虚拟现实在高校实验课程中的应用[J/OL].实验室研究与探索,1-9[2026-03-09].<https://link.cnki.net/urlid/31.1707.T.20260306.1250.040>.
- [15] 李季,杨蓉慧.元宇宙如何重塑企业人机协同模式——基于物流企业的多案例研究[J].物流研究,2025(6):80-92.
- [16] 施晓燕,卢整智.数字化驱动高等教育高质量发展的内在逻辑与经验证据[J].河北工程大学学报(社会科学版),2025,42(1):115-121.
- [17] 张静,童莉莉,陈光巨.人工智能驱动科教产融合的创新路径与生态构建——2025全球智慧教育大会“科教融汇与产教融合”平行会议综述[J].中国教育信息化,2025,31(10):81-89.
- [18] 任洪国,尚悦,王瑞丽.基于新型建构主义理论的VR技

术在建筑情感智能感知课程教学中的实践探索[J]. 河北工程大学学报(社会科学版), 2025, 42(4): 121-128.
[19] 秦爱文, 李俊, 王利娜, 等. 化纤生产实训课程虚拟仿真教学的构建与实践——以河南工程学院高分子材料与

工程专业为例[J/OL]. 高分子通报, 1-8 [2026-03-09]. <https://doi.org/10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.25.301>.

[责任编辑 李 新]

Research on the “Virtual-Real Fusion” Path of Intelligent Manufacturing System Optimization Ability Training for Graduate Students in Industrial Engineering

YUE Zhichun¹, ZHANG Xiaorui², WANG Yutao¹

(1. School of Management Engineering and Business, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;
2. Kexin College, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: With the acceleration of intelligent manufacturing, industrial engineering talents need to master core capabilities such as data-driven optimization and virtual-real collaborative management and control, while the traditional training model is difficult to meet the above needs due to the limitations of practical scenarios and the lack of complex system training. This paper focuses on the teaching path of “virtual-real integration”. First, it analyzes the core dimensions of intelligent manufacturing system optimization ability (system modeling, multi-objective decision making, dynamic scheduling), combines digital twin, AR/VR and other technical characteristics, and builds a three-stage training model of “cognitive-practice-feedback”. Secondly, the practical path of virtual-real complementarity is designed, which covers course reconstruction (mapping between virtual simulation and physical experiment), platform construction (data-simulation-application three-layer architecture) and dynamic evaluation system. Finally, through the analysis of the implementation effect and mechanism of the virtual and real integration training path, the important role of this path in improving the optimization ability of intelligent manufacturing system for industrial engineering graduate students is further clarified. The research proves that the virtual and real integration path can effectively bridge the gap between theoretical teaching and industrial practice through the dynamic feedback mechanism of digital twin, and provide reusable methodology support for the training of intelligent manufacturing talents.

Key Words: industrial engineering; intelligent manufacturing; virtual and real fusion; digital twins; system optimization