

# 数字孪生技术在高职物流虚拟仿真实训中的应用研究

## ——以智能仓储工厂全流程模拟为例

袁时雨

广西机电职业技术学院 广西南宁 530007

**摘要:**当前高职物流实训面临“高投入、高风险、流程碎片化”瓶颈,难以满足复合型人才培养与产业需求。本文提出基于数字孪生的智能仓储虚拟仿真实训体系,构建“边缘计算层+数字孪生镜像池+智能应用层”三层架构,整合轻量化建模、虚实协同控制等技术,实现入库验收、智能存储等全流程模拟。通过“数据驱动建模—岗位能力映射—产教共建”路径,弥合教育与产业技术鸿沟,缩短岗位适应周期,为物流职业教育提供“低成本、高保真、可扩展”的数字化解决方案,创新智慧物流人才培养模式。

**关键词:**数字孪生;智能仓储;虚拟仿真实训;全流程模拟;物流教育创新

传统物流实训教学长期面临“三高三难”问题:投入成本高、设备损耗高、安全风险高,且实施难度大、过程难观摩、场景难复现(如AGV叉车等设备采购成本高昂,人为误操作易损设备,多订单分拣等流程难反复复现)。与此同时,物流行业智能化转型背景下,智能仓储数字化运营能力成为企业核心竞争力。数字孪生技术通过构建物理实体虚拟镜像,实现数据驱动虚实交互,为破解实训难题提供新路径,既能规避设备损耗与操作风险,又能通过参数化建模复现全流程业务场景。

### 1. 研究现状与意义

国外研究以工业4.0为背景,侧重数字孪生与物流仿真技术深度融合,如利用工具优化运输路径与仓储布局,但较少涉及教育实训场景适配;国内研究聚焦职业教育领域,探索虚拟仿真场景培养技能,强调虚实交互提升考核精度。现有成果普遍存在两大局限:一是实训场景碎片化,缺乏仓储全链条系统性模拟;二是与岗位标准对接不足,难以体现智能仓储新兴技能需求。

聚焦智能仓储工厂全流程模拟,通过数字孪生技术构建“可视化、可交互、可扩展”虚拟仿真实训环境,覆盖入库验收、智能存储等核心环节。具体目标包括:实现堆垛机、分拣机器人等关键设备1:1数字化建模与状态同步;开发多角色协同实训场景(如仓管员、调度员等),强化岗位协同能力;通过虚拟故障注入提升设备故障、订单激增等异常响

应能力。

数字孪生技术应用于物流实训对专业教学与产业发展均具积极意义:教育层面可突破传统实训的“场地、设备、安全”限制,降低实训成本,通过“理虚实一体化”缩短学生从理论到岗位胜任的周期;产业层面能推动院校与企业“数据互通、场景共建”,助力解决人才供需错位、支撑智慧物流升级。因此,以“全流程闭环模拟+岗位能力精准培养”为导向构建智能仓储实训体系,整合多技术构建贴近企业真实场景的虚拟平台,可重点解决传统实训“流程割裂、技术滞后、评估粗放”问题,为物流实践教学提供可复制的数字化方案。

### 2. 数字孪生技术在智能仓储实训中的技术架构

#### 2.1 系统架构设计思路

传统物流实训架构普遍存在因“数据传输滞后、场景切换成本高”导致实训体验碎片化的现实问题。通过“边缘计算层+数字孪生镜像池+智能应用层”三层解耦架构,可以有效突破传统虚实映射的局限性:

**边缘计算层:**部署边缘服务器与物联网网关,通过轻量化协议(MQTT over TLS)实现传感器数据(AGV位置、货架温湿度等)微秒级传输,集成边缘智能算法本地执行设备故障预诊断(如分拣机轴承磨损预判),减轻云端计算压力。

**数字孪生镜像池:**构建参数化场景模板库(基础模块、设备模块、业务模块),支持10分钟内通过“拖拉拽”生

成新实训场景（如跨境电商仓、冷链仓），建模效率较传统方式提升 90%。

智能应用层：开发“实训驾驶舱”系统，集成多模态交互界面（VR+力反馈手套+语音）。教师可注入动态变量（突发订单、设备故障），学生在虚拟环境协同调整流程，结束后系统自动生成含操作精准度、决策时效的多维度评估报告。

## 2.2 技术实现与应用

### 2.2.1 轻量化建模技术：基于计算机视觉的快速孪生体生成

传统三维建模依赖专业人员与高精度设备，耗时较长，而引入单目视觉摄影测量技术，通过手机拍摄仓储设备多角度照片，利用 OpenMVS 等算法自动生成点云模型，结合泊松曲面重建技术生成可交互网格模型，建模成本可以大幅降低，其精度达毫米级。例如，对传统货架建模时，只需拍摄 10-15 张照片，即可在 2 小时内生成包含承重参数、货位编号的数字孪生体，支持实训场景快速搭建。

### 2.2.2 虚实协同控制技术：基于联邦学习的人机共融决策

针对“虚拟操作与物理设备控制脱节”问题，构建虚拟—物理协同的联邦学习驱动控制框架：虚拟端学生在 VR 环境中制定仓储调度方案（如 AGV 路径规划），通过强化学习生成候选策略；物理端由边缘控制器实时采集堆垛机作业周期等数据，经联邦学习节点与虚拟策略加密聚合生成最优执行方案。技术支持“虚拟试错—物理验证”闭环，如模拟订单激增场景时，虚拟端并行测试多策略，物理端仅执行聚合后的最优策略，提升实训效率并避免设备损耗。

### 2.2.3 沉浸式交互技术：混合现实与触觉反馈融合

针对传统 VR 实训缺乏物理触感反馈导致误差率高的问题，集成 Leap Motion 与 CyberGlove 力反馈手套，实现“虚拟抓取—理力反馈”实时同步：学生在虚拟环境中抓取货物时，手套模拟不同重量阻力，若违规操作则通过脉冲震动警告并红色高亮提示，提升操作规范度。试点应用中，“高位货架补货”实训平均耗时减少，设备碰撞事故零发生，显著提升安全性与效率。

### 2.2.4 动态评估技术：数字线程驱动的全流程追溯

动态评估技术通过数字线程驱动实现实训全流程追溯，构建数字线程串联操作日志、设备状态等全流程数据：一方面利用区块链存储不可篡改的操作记录；另一方面通过

LSTM 神经网络分析历史数据，针对分拣策略制定通过率低等技能薄弱点自动推送专项训练。从而推动实训评估从“结果导向”转为“过程+能力双维度评估”，提升考核信度与科学性。

## 3. 智能仓储工厂全流程模拟的应用场景设计

### 3.1 入库验收全流程模拟实训

场景描述：模拟电商大促“多品类混合”货物入库场景（含标准箱、异形件、冷链品），对接真实 WMS 系统生成的含供应商信息等的 XML 实训工单。

实训目标：掌握“到货登记—智能称重—视觉质检—托盘码放—系统录入”全链条操作，针对异形件用 3D 建模工具设计专用托盘，提升仓储空间利用率。

技术支撑：利用 Azure Kinect 深度相机扫描货物外形生成三维模型并匹配最优货位，集成电子围栏技术对托盘码放超安全阈值实时触发红光报警。

### 3.2 智能存储动态优化实训

场景描述：构建“动态库存环境”，包含日均出入库量  $\pm 30%$  波动、季节性爆品切换（如 618 大促前美妆品类占比从 10% 升至 35%）、滞销品积压（周转率  $< 0.5$  次/月）等工况。

实训目标：运用 ABC 分类法、遗传算法完成货位动态调整，使拣货路径平均缩短 20%；通过看板监控库存周转率、呆滞率等 12 项指标，制定“存储—分拣”联动优化策略。

技术支撑：开发“仓储热力图”工具，实时显示颜色梯度反映货位活跃度，红色区域（高频货位）自动触发机器人补货；集成数字孪生货架，学生拖拽虚拟货物模拟货位调整，系统自动计算效率变化。

### 3.3 智能分拣策略对比实训

场景描述：设计“订单波次分拣竞赛”，学生分组完成混合订单处理（如 B2C+B2B 订单），涵盖单品拣选、多品合单、复核包装等环节。

实训目标：对比“摘果式”“播种式”“AGV 集群分拣”三种模式效率，明确 B2C 订单占比  $> 60%$  时 AGV 模式效率提升 40%；训练异常处理能力，如分拣机器人故障时 10 分钟内切换至人工辅助模式。

技术支撑：采用 AnyLogic 离散事件仿真引擎实时对比关键指标；部署虚拟分拣机器人（UR10e 模型），支持 Python 脚本自定义分拣逻辑。

### 3.4 多模态出库调度实训

场景描述：模拟“仓运协同”场景，包含干线运输（9.6米厢式货车）、城配（新能源面包车）、即时配送（无人机）三种运输方式，对接 TMS 系统生成的路由计划（如冷链品 4 小时达、普通件次日达）。

实训目标：制定“出库优先级—车辆配载—路径规划”一体化方案，确保订单准时履约率 > 95%；优化车辆装载率（目标 > 90%），通过 3D 装箱算法减少空驶率。

技术支撑：开发“虚拟车场”模块实时显示车辆载重、容积及位置；集成百度地图 API 自动生成含限行、天气影响的最优路由。

### 3.5 仓储应急响应综合实训

场景描述：设置“复合危机事件”，如 5 台 AGV 导航系统离线 + 突降暴雨需 2 小时内转移高价值货物 + 客户紧急插单。

实训目标：15 分钟内启动应急预案，完成“故障隔离—人工接管—优先级重排—路径绕行”全流程；运用数字孪生模型预演方案，选择损失最小化策略（如优先转移高价值货物可减少 70% 损失）。

技术支撑：开发“应急策略知识库”，内置 50+ 故障解决方案，支持关键词检索；通过虚拟水浸传感器触发警报，联动三维模型高亮显示受影响区域。

## 4. 实施路径与案例分析

### 4.1 需求分析与场景定义

聚焦智慧仓储岗位能力建模，解构核心岗位群（仓管员、调度员、运维员）关键技能点，如 AGV 路径冲突处理、分拣策略优化、库存异常预警等。引入脱敏企业工单数据至实训场景，显著降低业务误差。结合“岗位能力雷达图”，实时监测学生技能掌握情况，通过分拣耗时、路径优化成功率等指标动态生成短板报告。

### 4.2 孪生模型构建

实现物理到虚拟的快速映射，采用轻量化建模对 2000 m<sup>2</sup> 仓储中心（含 500 货位、10 台 AGV）数字化复刻，通过“视觉扫描 + 参数录入”双轨建模：无人机 2 小时完成三维扫描，API 读取 PLC 数据确保模型误差 ≤ 2%；开发“仓储规则引擎”支持自定义规则，模拟冲突场景。学生可通过“场景编辑沙盒”修正参数（如 AGV 避障逻辑），经审核后纳入公共模型库，形成“学生反哺模型”生态<sup>[3]</sup>。

### 4.3 系统集成与虚实联动

系统集成与虚实联动构建闭环实训环境：通过 OData 协议集成云星空 WMS 实现虚拟库存同步，接入智能安防系统实时显示摄像头画面，形成“虚拟—现实—业务系统”三位一体；部署 5G 边缘计算网关，实现“AGV 前往 n 号货架”等指令毫秒级响应并回传数据形成闭环。创新“双引擎驱动”模式：教学以虚拟场景主导、设备辅助验证；实战以设备主导、虚拟场景为监控看板，两种模式可一键切换。

### 4.4 实训验证与效果评估

实训验证与效果评估通过数据驱动实现持续优化：开展对比实验，实验组（数字孪生实训系统）较对照组（传统方式）在常规场景“500 单订单出入库”任务中效率提升 46%（42 分钟 vs 78 分钟），异常场景“分拣机故障 + 订单激增”处理决策准确率达 89%（显著高于对照组 53%）；构建动态评估体系，开发“智能仓储实训评估区块链”，将处理时间、设备故障率等操作数据上链，通过智能合约自动计算技能得分，实现评估结果不可篡改且实时可查。

## 5. 结论

基于数字孪生技术构建智能仓储全流程虚拟仿真实训体系，能实现突破传统实训的“三高三难”瓶颈，实现“低成本、高安全、全流程、岗位化”的教育创新。采用“边缘计算层 + 数字孪生镜像池 + 智能应用层”三层架构，有效解决传统实训的“数据滞后、场景割裂”问题。此外，创新应用区块链、联邦学习、低代码等技术，可以有效构建安全可控、成本优化的实训生态。

当然，随着 AI 技术的不断发展，探索数字孪生与生成式 AI 的结合，开发“智能实训助手”，实现学生提问的实时语义解析与操作引导；拓展从单一仓储场景延伸至“仓、运、配”全供应链模拟；融入元宇宙技术打造“全真互联”实训空间场景；以及在实训场景、数据接口、能力评估的标准化建设，以促进区域乃至全国范围内的实训资源互通共享等方面也必将成为新的发展趋势。

## 参考文献

- [1] 陈春华. 基于“数字孪生”技术的物联网虚拟仿真实训基地研究[J]. 网络安全技术与应用, 2022(10).
- [2] 冉文学, 王秀荣, 耿林娜. 基于数字孪生技术的物流服务资源抉择问题研究[J]. 物流科技, 2024(9).
- [3] 韩磊, 左岩岩, 孙旭丹. 数字孪生技术驱动下高职

土木建筑类专业虚拟仿真实训基地建设研究 [J]. 张家口职业技术学院学报, 2024,37(1).

[4] 高剑, 白光利. 探讨数字孪生技术助力冷链物流园区的绿色发展 [J]. 起重运输机械, 2025(7).

[5] 刘如意, 阮晓华, 李旭东. 数字孪生技术在物流领域的应用 [J]. 物流技术, 2023,42(9).

[6] 张祎. 智慧物流中数字孪生技术的应用与分析 [J]. 网络安全技术与应用, 2025(3).