

多模态AI与数字孪生驱动的智能建造虚拟仿真 实训系统应用研究

万鑫* 李继明 蔡小玲 孙臻

无锡城市职业技术学院建筑与环境工程学院 江苏无锡 214000

摘要: 针对智能建造人才培养中传统实训存在的高危场景实操受限、虚实脱节、评估主观等问题, 本文将多模态AI与数字孪生技术融入虚拟仿真实训系统, 构建“虚拟认知—虚实联动—岗位实战”三阶递进体系。实践表明, 实验组BIM建模效率、智能设备操作规范率、施工方案优化能力较对照组分别提升42%、58%、45%, 毕业生岗位适应期缩短至1个月。研究形成的实训模式为智能建造人才培养提供了可复制的解决方案。

关键词: 多模态AI; 数字孪生; 智能建造; 虚拟仿真实训

一、研究背景与需求分析

1. 传统培养模式的现实瓶颈

智能建造人才培养中, 传统实训模式与产业需求的双重矛盾突出。一方面, 传统实训受“高危场景难实操、技能评估主观化、全流程协同训练缺失”制约, 与土建类实训“高投入、高难度、高风险、难实施、难观摩、难再现”特征高度契合^[1]; 据无锡10家建筑企业2024年新员工考核数据, 68%员工在智能设备操作、BIM技术等核心技能存在断层, 难以快速适配岗位。

另一方面, 产业需求与教学内容脱节显著。无锡作为装配式建筑占比超55%的产业高地, 企业迫切需要“虚拟仿真—实体施工”全流程能力, 但现有实训虚实衔接度不足40%, 梅雨季地面沉降、软土地基处理等地域化工况模拟缺失, 印证了智能建造实训基地在虚实联动方面的短板^[2]。

2. 技术赋能的可行性与机遇

多模态AI与数字孪生技术的融合, 为突破传统实训瓶颈提供了全新路径。多模态AI通过整合视觉、传感器、语音等跨模态数据, 可实现实训过程的全域感知与动态纠错。数字孪生与虚拟仿真的协同则重构了实训场景。基于BIM模型构建的数字孪生体, 高危场景训练覆盖率可提升至100%, 解决教学中“看不到、有危险、高

成本”的实操难题^[3]。

3. 研究目标与体系构建定位

本研究旨在构建“技术融合+岗位适配”的智能建造虚拟仿真实训体系, 聚焦解决三个核心教学问题: 一是如何通过虚拟仿真技术精准还原高危复杂场景, 在保障安全的前提下提升实训有效性; 二是如何利用多模态AI实现技能评估的量化与个性化指导, 并适配不同基础学生的提升需求; 三是如何通过虚实联动训练, 强化学生对智能建造全流程的协同能力^[4]。通过这一体系的构建, 实现人才培养与产业需求的精准对接, 为智能建造领域培养兼具数字技术应用能力与实操经验的复合型人才。

二、理论基础与实训体系设计

1. 理论基础与实训系统适配逻辑

本研究以三大理论为底层支撑, 构建理论与智能建造实训系统的适配逻辑, 精准对接教学需求。

职业教育情境学习理论指导数字孪生场景“真实性复刻”, 聚焦无锡地域工况(梅雨季深基坑土壤含水率变化、软土地基沉降特性)搭建虚拟场景, 通过“操作—反馈—调整”闭环, 让学生直观理解《建筑施工规范》实操内涵, 破解传统“图纸+模型”教学中规范记忆与现场应用脱节的问题。

建构主义学习理论支撑多模态AI引导式反馈设计, 系统不直接纠错, 而是通过视觉捕捉吊点偏差、传感器数据判断应力异常生成问题提示, 促使学生自主关联理论与实操, 形成“发现问题—溯源规范—优化操作”的能力闭环, 强化复杂工况应对能力。

智能建造全流程协同理论指导系统数据互通架构开发, 要求设计模块BIM模型驱动生产模块生成构件参数,

基金项目:

无锡城市职业技术学院2023年度校青蓝工程中青年学术带头人(070300200208);

2025-2026年度江苏职业教育研究课题: XHYBLX2025244

作者简介: 万鑫(1984), 男, 硕士研究生, 副教授。

施工模块基于生产数据开展吊装模拟, 联动运维模块验证全生命周期性能, 让学生直观感知“设计—生产—施工—运维”环节关联性^[6], 培养系统思维, 避免割裂训练的局限。

2. 技术支撑下的实训体系架构设计

虚拟仿真系统作为“虚实融合教学载体”, 承担双重角色: 数字孪生场景作为“施工场景模拟器”, 复刻高危复杂工况, 如无锡梅雨季深基坑施工, 学生可反复演练“暴雨积水—边坡预警—应急加固”流程, 系统模拟土壤含水率变化, 确保训练贴近实际; 多模态AI作为“技能评估与指导者”, 融合12项指标如操作规范度、参数优化速度等生成“技能雷达图”, 精准定位技能短板替代主观评分。

体系设计以“三阶教学链”为核心逻辑, 遵循“认知—迁移—应用”的能力进阶路径, 推动技术标准向教学内容、岗位需求的深度转化。第一阶“虚拟仿真筑基”阶段, 将智能建造核心技术拆解为BIM建模规范、装配式施工标准等模块化教学单元, 借助虚拟场景直观呈现深基坑支护力学平衡原理^[7], 多模态AI通过比对操作与行业规范, 强化学生对技术标准的精准认知; 第二阶“虚实联动迁移”阶段, 基于虚拟仿真生成的施工方案, 联动实体沙盘与机械臂开展实体验证, 通过分析虚拟计算值与实体实测值的偏差, 引导学生理解梅雨季地面沉降等地域因素对施工精度的影响, 实现理论向实践的转化; 第三阶“岗位实战应用”阶段, 引入企业真实项目场景, 学生在数字孪生系统中完成智慧工地“扫描—建模—施工模拟”全流程任务, 企业工程师依据岗位标准开展方案评审, 推动技术能力向岗位实战素养的转化, 达成“毕业即上岗”的培养目标。

三、多模态AI与数字孪生驱动的实训模式创新

1. “三阶递进”虚拟仿真实训模式构建

基于上述“三阶教学链”设计思路, 构建“虚拟认知—虚实联动—岗位实战”三阶递进教学模式, 聚焦各阶段实训内容与实施路径, 实现从基础技能到岗位能力的阶梯式落地。

虚拟认知阶段以标准化仿真训练为核心, 旨在夯实技术规范认知。依托数字孪生系统搭建“装配式构件生产全流程”虚拟场景, 学员通过VR设备沉浸式操作预制构件模具设计、钢筋绑扎等关键工序, 系统同步生成三维动画演示质量控制点; 多模态AI结合摄像头轨迹捕捉与虚拟传感器数据, 以语音实时提示操作偏差。经120学时训练, 学员对装配式生产规范的掌握度超90%, 形

成对技术标准的条件反射式响应。

虚实联动阶段以项目化实训为抓手, 破解虚实衔接断层问题。以“深基坑支护智能施工”为载体, 学员先在虚拟系统完成支护方案设计并生成力学报告, 核心参数传输至1:10实体沙盘驱动机械臂搭建结构; 传感器采集土压力、位移数据后, 多模态AI对比虚拟计算值与实测值, 生成偏差报告, 引导学员分析原因。经6个典型工况训练, 学员虚拟方案与实体施工匹配度从40%提升至75%, 建立“虚拟优化—实体验证”工程思维。

岗位实战阶段以企业真实项目为依托, 推动能力向岗位需求转化。联合无锡地铁集团将智慧工地项目转化为实训任务, 学员完成无人机扫描点云、BIM场地建模、施工方案设计等全流程操作, 企业工程师从效率、合规、成本维度评审优化。此阶段学员施工方案编制能力显著提升, 毕业岗位适应期缩短至1个月。

2. 跨专业协同教学机制与平台应用

为破除专业壁垒、培育学员系统思维与协作能力, 依托虚拟仿真平台构建跨专业协同教学机制。明确各专业协同角色: 建筑工程技术专业主导BIM施工模拟, 计算机应用技术专业负责虚拟系统功能开发, 物联网专业承担智能设备数据接入与分析; 各专业通过平台实现数据互通, 建筑专业BIM模型为计算机专业提供建模基础, 物联网专业传感器数据支撑建筑专业施工模拟, 形成“设计—开发—应用”闭环。

以“智慧工地数字孪生系统”实训为实例, 各专业协同完成“虚拟工地搭建—数据采集—功能验证”全流程。建筑专业搭建合规BIM模型, 物联网专业嵌入虚拟传感器并设定采集频率, 计算机专业开发数据可视化看板; 实训中需跨专业沟通解决模型精度不足、预警阈值不合理等问题。经训练, 85%学员能准确定位角色并高效配合, 协作意识显著提升。

3. 校企协同的实训资源开发与建设

深化产教融合, 通过校企协同保障教学内容与行业标准对接。与广联达、无锡二建共建“智能建造虚拟仿真案例库”, 筛选8个典型项目, 提取核心技能点转化为标准化实训任务; 案例库纳入多模态数据, 无锡二建提供装配式吊装参数、深基坑监测日志, 广联达提供BIM模型与成本数据, 确保虚拟场景匹配企业实际。

建立“双师协同”常态化机制。企业技术骨干每月投入8课时参与虚拟场景搭建, 校准装配式构件吊装参数等核心指标并植入无锡地域工程难点; 每学期联合开展2次教学评价, 将企业KPI纳入学生考核(权重

≥30%)。双方制定《智能建造虚拟仿真实训校企协同管理办法》，明确企业职责、教师企业实践时长及成果转化路径，确保产教融合落地。

四、实践成效、问题与优化方向

1. 教学实践成效

选取建筑工程技术专业两个平行班开展一学期对比教学，实验组采用“虚拟仿真+多模态AI”模式，对照组沿用传统实训，教学效果差异显著。实验组技能提升优势通过量化数据明确体现，详见表1，较对照组的方案照搬模式，凸显“虚拟试错—AI反馈—实体验证”闭环训练对工程思维的培育价值。这种从“记忆技术标准”到“灵活应用标准”的能力跃迁，与两组技能指标差异形成呼应，印证了该实训教学模式的实效。

表1 实验组与对照组技能对比表

技能指标	实验组 (n=45)	对照组 (n=43)	差异值	提升幅度
BIM建模效率 (个/小时)	28.6	20.1	+8.5	42%
智能设备操作规范率 (%)	91.3	57.8	+33.5	58%
施工方案优化能力 (评分/100)	82.5	57.0	+25.5	45%

教学质量实现效率与满意度双提升。多模态AI全覆盖实训评估，自动记录轨迹、计算偏差并生成报告，教师批改时间从4小时/班缩短至1.6小时/班，效率提升60%。92%学员认可“虚拟与实体施工衔接度”，认为有效解决了“虚拟操作与现场脱节”问题。

2. 企业反馈与社会辐射效应

无锡二建等企业反馈，新模式培养的毕业生岗位适应期从3个月缩至1个月，数字技术应用能力达标率从40%升至80%，65%可主导虚拟方案编制，且对“虚拟与实体数据偏差”敏感性增强；该模式被无锡其他高职院校借鉴，智能建造实训设备成本降低30%，社会辐射效应逐步扩大。

3. 现存问题与优化路径

实践中存在两方面问题：一是虚拟场景参数精度不足，如混凝土强度模拟误差约5%，因未纳入无锡地域地质气象因素；二是80%教师能看懂多模态AI“技能雷达图”数据，但难关联学生认知短板。优化路径为：联合广联达升级仿真引擎，植入无锡近5年地质气象数据建

“地域化材料参数库”，将模拟误差控制在3%内；开发教师AI技术应用课程，通过“案例解析+实操”强化数据驱动教学能力，推动人才培养从适配岗位向引领行业升级。

五、研究结论与推广应用建议

本研究整合多模态AI与数字孪生技术，构建“虚拟仿真+多模态AI”智能建造实训模式，实现三大突破：实训场景从“局部模拟”升级为全流程仿真，技能评估从教师主观判断转向12项指标数据量化，教学协同从单一岗位拓展至跨专业与校企全链条融合。同时提炼“虚拟场景开发—虚实联动训练—企业实战验证”核心实施路径，配套《智能建造虚拟仿真实训指南》明确技术转化与设备标准，为高职智能建造专业提供实训模板。

该模式推广价值突出，同类院校可依托现有BIM设备改造轻量化系统，降低60%初期投入，适合分阶段推进；产业端可校企共建“智能建造虚拟仿真认证中心”，挂钩企业技能认证，缩短新员工培训周期并反哺教学，为职教对接产业需求提供实践范式，助力“教育链—人才链—产业链”融合。

参考文献

- [1]李强,徐运明.土建类职业院校虚拟仿真实训基地“3132”建设模式的实践探索[J].湖南教育,2024(19):47-49.
- [2]李晨,刘美霞,张军,等.职业教育智能建造开放型产教融合实训基地建设与管理研究[J].住宅产业,2023(12):50-54.
- [3]王森.智能建造虚拟仿真实训基地在教学中的应用探究——以建筑工程技术专业为例[J].林区教学,2024(09):60-63.
- [4]李建强.新工科背景下土木——智能建造实践基地建设实践[J].知识窗,2024(12):83-85.
- [5]付天宇,史新民.基于工业互联网的云制造虚拟仿真实训基地建设探索——以常州信息职业技术学院为例[J].中国教育技术装备,2024(11):146-149.
- [6]杨世金.“三化”背景下新时代智能建造实训基地建设探究[J].广西教育,2023(21):28-32.
- [7]冯耀纪,李丝露,刘学军.智能建造背景下的高职院校智能建造实训基地建设研究[J].房地产世界,2025(01):68-70.