

面向复杂工程问题解决能力的桥梁工程数字孪生教学模式创新研究

任雅露^{1,*}, 刘昱¹, 李昊¹

1. 辽宁科技大学, 土木工程学院, 辽宁 鞍山, 114051

摘要: 针对传统桥梁工程教学中存在的知识供给滞后、实践情境浅表、学习路径同质、评价反馈终结等问题, 本文以工程教育认证的成果导向理念(OBE)和 CDIO 工程教育模式为理论依据, 提出一种面向复杂工程问题解决能力的数字孪生驱动教学模式。通过问卷调查与访谈, 对桥梁工程课程教学现状进行诊断, 发现课程内容与智能建造、数字孪生、BIM 等产业新技术衔接不足, 学生完整参与桥梁设计—施工—运维全流程的机会有限, 实践评价多依赖报告, 缺少过程性证据。基于此, 本文构建了“一核双线三阶四维”教学模式: 以复杂工程问题解决能力为“一核”; 以知识建构线和工程实践线为“双线”; 以基础认知、综合设计、创新拓展为“三阶”; 以内容重构、平台支撑、项目驱动、评价反馈为“四维”。同时, 设计课前知识图谱导学、课中孪生项目探究、课后迭代优化、课赛研创融通的混合式实施路径, 并建立“证据链+能力雷达”多元评价体系。初步实践表明, 该模式能提升学生的桥梁工程系统认知、数字工具应用、协作沟通与创新设计能力, 可为新工科背景下桥梁工程教学改革提供一定参考。

关键词: 桥梁工程; 数字孪生; 知识图谱; OBE; CDIO; 教学模式

A Study on the Innovative Teaching Model of Bridge Engineering Based on Digital Twin and Competency Graph

Ren Yalu^{1,*}, Liu Yu¹, Li Hao¹

1. University of Science and Technology, School of Civil Engineering, Anshan, Liaoning, China, 114051

Abstract: To address the issues of lagging knowledge supply, superficial practical contexts, homogeneous learning paths, and terminal assessment feedback in traditional bridge engineering teaching, this paper proposes a digital twin-driven teaching model oriented toward complex engineering problem-solving ability, grounded in the outcomes-based education (OBE) philosophy of engineering education accreditation and the CDIO engineering education model. Through questionnaire surveys and interviews, the current teaching status of bridge engineering courses was diagnosed. The findings reveal insufficient integration of course content with new industrial technologies such as intelligent construction, digital twins, and BIM; limited opportunities for students to fully participate in the entire bridge design–construction–operation and maintenance process; and practical assessment that relies mostly on reports while lacking process evidence. On this basis, this paper constructs a “one core, two lines, three stages, and four dimensions” teaching model: taking complex engineering problem-solving ability as the “one core”; knowledge construction and engineering practice as the “two lines”; foundational cognition, integrated design, and innovation expansion as the “three stages”; and content reconstruction, platform support, project-driven learning, and evaluation feedback as the “four dimensions.” It also designs a blended implementation pathway consisting of pre-class knowledge graph-guided learning, in-class digital twin project inquiry, post-class iterative optimization, and course–competition–research–innovation integration, and establishes a diversified evaluation system based

on an “evidence chain + competency radar.” Preliminary practice shows that this model can enhance students’ systematic understanding of bridge engineering, digital tool application, collaborative communication, and innovative design abilities, providing a reference for bridge engineering teaching reform in the context of emerging engineering education.

Keywords: Bridge Engineering; Digital Twin; Knowledge Graph; OBE; CDIO; Teaching Model

桥梁工程是土木工程专业的重要核心课程,其教学质量直接影响学生工程实践能力、系统设计能力和职业素养的形成。赵秋等^[1]较早指出,桥梁工程概论类课程存在内容庞杂、课时有限、理论与实践结合不足等问题,传统教学容易停留在概念介绍和构造讲解层面。随着桥梁工程向大跨度、深水化、复杂结构、智能建造和全生命周期运维方向发展,行业对人才的要求已经从“会计算、懂构造”转向“能分析、会设计、善协作、可创新”。刘勇健等^[2]强调,土木工程实践教学应以解决复杂工程问题能力培养为导向,通过真实项目和多维评价促进学生能力生成。

近年来,BIM、数字孪生、知识图谱和人工智能等技术快速发展,为桥梁工程教学改革提供了新的技术条件。邹兰林和朱晓宏^[3]研究了BIM技术融入桥梁工程课程教学的策略,认为BIM能够提升学生对桥梁构造、施工过程和协同设计的理解。亢秀山等^[4]提出基于数字孪生的复杂风场下斜拉-悬索桥建造过程虚拟仿真方法,为桥梁建造过程的数字化教学提供了技术参照。吴安杰和武艺^[5]以贵州理工学院为例,探讨了知识图谱在桥梁工程课程教学改革中的应用,认为知识图谱有助于梳理课程知识关联、支持精准教学。朱婷婷等^[6]在AIGC背景下研究了基于知识图谱的个性化教学改革,指出知识图谱与生成式人工智能结合可以提升学习资源推荐和学情诊断的精准性。任艳^[7]设计了基于分层知识图谱的个性化学习推荐系统,为分层教学和个性化路径设计提供了方法参考。

在工程教育理念方面,邓友生等^[8]提出基于OBE-CDIO理念的土木工程新工科人才培养模式,强调成果导向与全过程工程实践的融合;郭会琴等^[9]融合OBE理念开展工科一流课程教学设计,证明反向设计、持续改进对课程质量提升具有重要作用;温彭年、贾国英^[10]系统梳理建构主义学习理论,强调学习者在真实情境中主动建构知识。上述研究为本文提供了理论基础。本文从复杂工程问题解决能力培养出发,探索数字孪生、知识图谱与项目制教学深度融合的桥梁工程教学模式。

基于此,本文从复杂工程问题解决能力培养出发,构建“一核双线三阶四维”桥梁工程数字孪生教学模式:以复杂工程问题解决能力为“一核”,以知识建构线和工程实践线为“双线”,以基础认知、综合设计、创新拓展为“三阶”,以内容重构、平台支撑、项目驱动、评价反馈为“四维”,并配套“证据链+能力雷达”评价体系,以期为新工科背景下桥梁工程教学改革提供参考。

1 桥梁工程教学现状调研与问题诊断

1.1 调研设计

为准确识别传统桥梁工程教学中的关键问题,本研究于2026年3—5月选取我国东北地区3所高校土木工程专业桥梁工程方向学生、任课教师及合作企业工程师作为调研对象。共发放学生问卷312份,回收有效问卷296份;教师问卷27份,回收有效问卷26份;企业工程师问卷34份,回收有效问卷32份。同时,对18名骨干教师、企业工程师和优秀学生进行半结构化访谈。调研内容包括课程内容前沿性、实践环节参与度、学习路径适配性、评价方式合理性、校企协同程度等。

1.2 主要问题

(1) 知识体系碎片化与产业技术滞后化并存。调研显示,76.4%的学生认为桥梁工程课程内容偏重经典理论和标准构造,对智能建造、数字孪生、BIM协同设计、健康监测等新技术引入不足;

82.1%的企业工程师认为毕业生对行业常用数字化工具和工程数据管理流程不熟悉。传统教学按章节推进,学生容易把桥梁构造、力学分析、设计计算和施工组织割裂理解,难以形成“设计—建造—运维”一体化知识框架。

(2) 实践训练观摩化与复杂工程浅表化并存。70.3%的学生反映实践环节以现场参观、报告撰写为主,完整参与桥梁建模、受力分析、施工模拟和方案优化的机会有限;仅24.7%的学生表示曾独立完成一个较完整的桥梁数字化建模与分析任务。由于桥梁工程现场存在安全风险、工期限制和场地条件约束,学生很难反复观察关键工序,更难进行多方案比较和失败重构。

(3) 学习路径同质化与能力发展差异化矛盾。73.1%的学生希望课程提供分层、分类的学习任务,但传统教学多采用统一进度、统一任务和统一标准,基础薄弱学生容易掉队,能力较强学生又缺少挑战性任务。桥梁工程课程涉及力学、材料、构造、施工、检测等多个知识领域,不同学生的兴趣和职业规划差异明显,单一教学路径难以满足个性化培养需求。

(4) 评价反馈终结化与能力达成过程化矛盾。68.9%的学生认为实践成绩主要由实习报告或最终成果决定,过程中是否真正参与建模、分析、讨论和修改,对成绩影响不大;73.6%的教师认为缺少便捷的过程性数据采集工具,难以判断学生在团队中的实际贡献。这种评价方式容易导致“重报告、轻过程”、“重结果、轻能力”,也无法为教学持续改进提供可靠证据。

(5) 校企协同松散化与工程情境真实化矛盾。调研中,79.2%的企业工程师表示愿意参与高校教学,但实际参与频率较低,多集中在讲座或毕业设计指导环节。企业真实项目、施工工法、监测数据和工程问题未能系统转化为教学资源,导致课堂中的工程情境与一线需求仍有距离。

2 理论基础与改革思路

2.1 理论基础

本文以OBE成果导向教育、CDIO工程教育模式、情境学习理论和建构主义学习理论为基础。OBE强调以学生最终能力达成度反向设计课程目标、教学活动和评价标准;CDIO强调构思、设计、实现、运行的全过程工程实践;情境学习理论认为,能力应在接近真实的情境中形成;建构主义强调学生通过主动探究、协作交流和反思迭代建构知识。

数字孪生技术为上述理论落地提供了新载体。通过建立桥梁结构、施工场景和运维状态的数字映射,学生可以在数字空间中完成建模、分析、模拟、监测和优化,形成“做中学、错中改、研中创”的学习闭环。知识图谱则把分散知识点连接为可查询、可追溯、可推荐的知识网络,帮助学生建立系统认知。AI助教可承担学习行为记录、学情诊断和资源推荐等辅助功能,但评价的最终判断仍由教师完成。

2.2 改革思路

本文的核心改革思路是:从“知识传授”转向“能力生成”,从“虚拟仿真辅助”转向“数字孪生驱动”,从“统一讲授”转向“分层分类”,从“终结考核”转向“证据评价”。具体包括四条主线:1. 能力主线:以复杂工程问题解决能力为核心,反向设计课程目标与毕业要求指标点。

2. 知识主线:以知识图谱梳理桥梁工程知识关联,形成结构化、可视化、可诊断的知识体系。

3. 实践主线:以真实项目链为载体,组织学生完成认知、设计、模拟、优化和创新任务。

4. 评价主线:以过程证据、成果证据和创新证据构建能力达成度评价机制。

3 基于数字孪生与知识图谱的教学模式构建

3.1 构建理念与目标

本模式以“能力为本、项目载体、数据驱动、持续改进”为理念，目标包括：一是使学生掌握桥梁工程基本理论、构造原理和设计方法；二是使学生具备运用数字孪生、BIM、有限元等工具进行建模、分析和施工模拟的能力；三是培养学生面向复杂工程问题的系统思维、协作沟通和创新意识；四是建立可追踪、可反馈、可改进的教学评价机制。

3.2 总体架构：“一核双线三阶四维”

本文构建“一核双线三阶四维”教学模式，详见图 1。



图 1 “一核双线三阶四维”桥梁工程教学模式总体架构

Fig. 1 Overall architecture of the "one core, two lines, three stages, and four dimensions" teaching model for bridge engineering

3.3 教学内容重构

围绕桥梁工程核心能力，将课程内容重构为五个模块：1.桥梁认知与构造模块：桥梁分类、桥跨结构、墩台基础、支座与附属设施；2.力学分析与设计模块：荷载组合、内力计算、配筋设计、稳定与变形验算；3.施工组织与模拟模块：施工工序、支架与挂篮、体系转换、施工阶段受力分析；4.智能检测与运维模块：健康监测、病害识别、加固改造、全生命周期管理；5.协同创新与工程伦理模块：BIM 协同、方案比选、工程伦理、团队沟通。

3.4 平台支撑

桥梁工程数字孪生教学平台，集成 BIM 建模、有限元分析、施工模拟、监测数据展示、知识图谱和 AI 助教等功能。平台应具备以下特点：

- 可视化：把抽象力学原理和复杂构造转化为三维模型、动画和交互场景。
- 可重复：学生可反复调整参数、修改方案、观察结果，突破现场实习不可重复的限制。
- 可追踪：记录学生操作时长、模型版本、任务进度、讨论贡献等过程数据。
- 可协同：支持小组在线协作、版本管理和教师远程指导。

可扩展：接入企业真实项目数据、监测数据和规范标准，保持教学内容动态更新。

3.5 教学组织

采用“线上自主学习+线下集中研讨+项目驱动实践+校企双师指导”的混合式教学组织。线上环节提供知识图谱导学、微课、操作教程和案例库；线下环节开展重点讲解、小组研讨、成果汇报和答辩；项目环节引入企业真实课题或竞赛题目，由教师和企业工程师共同指导。

4 教学实施路径

课前，教师发布知识图谱和学习任务，学生通过平台完成诊断测试，了解自身知识薄弱点。平台根据测试结果推荐微课、规范条文和案例模型。学生提前进入数字孪生场景，观察桥梁构造和施工流程，形成初步问题清单。课中，教师以真实桥梁项目为载体，将任务拆解为建模、计算、模拟、比选和汇报等子任务。学生分组承担不同角色，如结构分析、施工模拟、造价与工程量、汇报展示等。教师和企业工程师针对关键问题进行现场指导，鼓励学生提出多方案并进行论证。课后，学生根据课堂反馈修改模型、优化方案、补充计算书，并在平台上提交迭代版本。AI助教记录版本变化和操作轨迹，教师据此判断学生的学习投入和改进过程。学生还需撰写反思报告，说明方案取舍、技术难点和团队协作情况。

将课程教学与学科竞赛、大学生创新创业训练计划、企业横向课题和毕业设计贯通。优秀课程成果可转化为竞赛作品、专利申请或毕业设计题目。通过“课程—竞赛—科研—工程”联动，提升学生创新能力和工程表达能力。

5 “证据链+能力雷达”考核评价体系

为克服传统评价重结果、轻过程的问题，本文建立“证据链+能力雷达”多元评价体系。评价由过程性评价、成果性评价和创新性评价三部分组成，AI助教辅助采集数据，教师负责最终判定。

5.1 过程性评价（40%）

过程性评价关注学习全过程的参与度、投入度和成长性。证据包括：线上学习时长、知识图谱诊断结果、软件操作记录、阶段任务完成情况、课堂讨论参与、小组协作贡献、模型迭代次数等。AI助教生成学情画像和预警提示，教师结合课堂观察进行综合评价。

5.2 成果性评价（40%）

成果性评价以学生提交的模型、计算书、施工模拟动画、实验报告和汇报答辩为核心。评价要点包括：模型完整性、计算准确性、规范符合度、施工模拟合理性、报告逻辑性和表达清晰度。采用教师评价与小组互评相结合的方式，确保评价客观。

5.3 创新性评价（20%）

创新性评价重点考察学生在方案设计、技术应用和问题解决中的创新表现。例如，是否提出新的桥型方案、是否优化施工工序、是否引入监测数据改进设计、是否在竞赛或企业课题中形成可推广成果。评价方式包括教师评价、企业工程师评价和成果答辩。

5.4 能力雷达

建立六维能力雷达：力学分析能力、设计计算能力、施工组织能力、数字工具能力、协作沟通能力、创新与工程伦理意识。每项能力对应课程目标指标点，通过多来源证据进行达成度计算。能力雷达可用于学生自我诊断、教师教学改进和专业持续改进。

6 初步成效与讨论

初步教学实践显示，该模式可有效提升课程目标达成度、复杂工程问题解决能力以及企业导师

对毕业生数字工具应用和方案表达满意度。该模式的优势在于：一是通过知识图谱帮助学生建立系统认知；二是通过数字孪生提供可重复、可交互、可追踪的工程情境；三是通过项目链推动学生从被动听讲转向主动探究；四是通过证据链评价促进教学持续改进。

综上，针对桥梁工程教学中知识碎片化、实践浅表化、路径同质化和评价终结化等问题，本文从复杂工程问题解决能力培养出发，构建了基于数字孪生与知识图谱的“一核双线三阶四维”教学模式。该模式以能力为核心，以知识与实践双线并进，以基础认知、综合设计、创新拓展三阶递进，以内容、平台、项目、评价四维联动，并配套“证据链+能力雷达”评价体系。研究表明，该模式有助于提升学生的系统设计能力、数字工具应用能力、协作创新能力和工程伦理意识，可为新工科背景下桥梁工程教学改革提供参考。当然，该模式也面临平台建设成本较高、教师数字素养要求较高、企业数据脱敏复杂等挑战，需要在后续研究中进一步完善。

参考文献

- [1] 赵秋, 陈友杰, 上官萍. 桥梁工程概论教学改革探讨[J]. 高等建筑教育, 2014, 23(4): 72-75.
- [2] 刘勇健, 罗岚, 肖雪莉, 等. 以解决复杂工程问题能力培养为导向的土木工程实践教学改革[J]. 大学教育, 2025(23): 57-60.
- [3] 邹兰林, 朱晓宏. BIM 技术融入桥梁工程课程教学的策略研究与实践探析[J]. 科教导刊(电子版), 2025(34): 10-12.
- [4] 亢秀山, 罗垒, 雷蕾, 等. 基于数字孪生的复杂风场下斜拉-悬索桥建造过程虚拟仿真方法[J]. 中国公路学报, 2025, 38(6): 84-95.
- [5] 吴安杰, 武艺. 基于知识图谱的桥梁工程课程教学改革探讨——以贵州理工学院为例[J]. 教育观察, 2024(30): 40-43.
- [6] 朱婷婷, 汤海林, 叶裴雷. AIGC 背景下基于知识图谱的个性化教学改革实践[J]. 电脑知识与技术, 2025, 21(15): 176-180.
- [7] 任艳. 基于分层知识图谱的个性化学习推荐系统设计与实现[J]. 电脑知识与技术, 2026, 22(6): 32-35.
- [8] 邓友生, 李文杰, 唐丽云, 等. 基于 OBE-CDIO 理念的土木工程新工科人才培养[J]. 技术与创新管理, 2023, 44(3): 364-369.
- [9] 郭会琴, 颜流水, 尹继祥, 等. 融合 OBE 理念的工科专业一流课程教学设计与实践——以“环境分析化学”课程为例[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2023, 37(3): 140-146.
- [10] 温彭年, 贾国英. 建构主义理论与教学改革——建构主义学习理论综述[J]. 教育理论与实践, 2002, 22(5): 17-22.

基金项目：教育部产学合作协同育人项目—实践条件和实践基地建设—桥梁实训基地虚拟实验室建设（241102554052051）；辽宁科技大学 2025 年度实验教学改革项目—Midas 桥梁虚拟实验室建设与教学改革（2025XNFZ-25453）。

第 1 作者&通讯作者简介：任雅露（1992-），女，博士研究生在读，讲师，研究方向：建筑材料、桥梁智能检测。E-mail: yalul@ustl.edu.cn。