

数字孪生驱动的电气专业产教融合实践教学体系构建

石颢, 刘敏, 曹科才

(苏州科技大学, 电子与信息工程学院, 江苏 苏州, 215000)

摘要: 针对电气工程专业产教融合实践教学中长期存在的高危险性、难触及性、不可再现性等瓶颈问题, 本文构建了一套数字孪生驱动的分层递进式实践教学体系。该体系以 OBE 成果导向为核心, 搭建“孪生资源层—平台支撑层—教学应用层”三层架构, 建立关键电力设备数字孪生模型库与脱敏工业数据沙箱, 研发集状态感知、仿真推演、智能评估于一体的云平台, 并设计“认知—诊断—预测”三阶递进教学场景, 将高危不可逆的工业现场转化为安全、可重复、可探究的教学环境。为期 4 周、共 16 学时的准实验教学验证表明: 该体系可使学生知识掌握度提升 18.2%, 故障诊断准确率提升 25.7%, 剩余寿命预测误差降低 32.4%, 学习综合满意度达 94.3%, 显著提升学生知识应用、工程实践与创新思维能力。研究成果可为新型电力系统背景下电气专业数字化、智能化工程人才培养提供参考方案。

关键词: 数字孪生; 电气工程; 产教融合; 实践教学; 状态感知; 健康管理

Digital Twin-Driven Construction of a Practice Teaching System for Industry-Education Integration in Electrical Engineering

Shi Jie, Liu Min, Cao Kecai

(School of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215000, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at the long-standing teaching bottlenecks such as high risk, inaccessibility and non-reproducibility in the practice teaching of industry-education integration for electrical engineering, this paper constructs a digital twin-driven hierarchical and progressive practice teaching system. Guided by OBE outcomes-based education, the system adopts a three-layer architecture: twin resource layer, platform support layer and teaching application layer. It establishes a digital twin model library of key power equipment and a desensitized industrial data sandbox, develops a cloud platform integrating state perception, simulation deduction and intelligent evaluation, and designs a progressive teaching scenario of “cognition-diagnosis-prediction”, which transforms the high-risk and irreversible industrial site into a safe, repeatable and explorable teaching environment. A 4-week (16 class hours) quasi-experiment shows that the system improves students’ knowledge mastery by 18.2%, fault diagnosis accuracy by 25.7%, reduces the residual life prediction error by 32.4%, and the comprehensive learning satisfaction reaches 94.3%, which significantly enhances students’ knowledge application, engineering practice and innovative thinking abilities. The research results can provide a reference for the cultivation of digital and intelligent engineering talents in electrical engineering under the background of new power system.

Key words: digital twin; electrical engineering; industry-education integration; practice teaching; condition perception; health management

电气工程及其自动化是支撑国家能源安全与新型电力系统建设的战略性核心专业, 人才培养质量直接影响电网智能化发展水平^[1,2]。然而当前该专业实践教学体系在对接电网公司及电力设备制造企业等真实产业需求过程中, 长期面临三重矛盾: 一是高危险性, 高压设备现场操作风险极高; 二是不可及性,

收稿日期: 2026-04-08; 在线发表日期: 2026-04-14

资助项目: 江苏省高等教育教改研究重中之重课题: AIGC 赋能下理工高校人工智能教育与创新创业融合路径研究 (2025JGZZ46)

第一作者: 石颢 (1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事电气设备状态感知与健康管理, 电类专业教学改革与实践。

设备内部结构及故障演化过程难以观察，导致理论认知与实践严重脱节；三是静态性与动态性的脱节，教学内容更新滞后于产业智能化运维的快速发展^[3]，但高校缺乏真实数据与先进平台支撑，致使教学内容严重落后于产业实践，最终在毕业生能力与产业岗位需求之间形成显著的技能鸿沟。

电气设备状态感知与健康管理作为应对上述产业瓶颈的前沿方向，其教学实施高度依赖于对设备全生命周期数据与内在物理机理的深度融合与动态呈现^[4]。数字孪生技术通过构建虚实映射的高保真模型^[5]，为破解上述教学困境、实现教学场景与工业现场的无缝对接提供了极具潜力的解决方案。基于此，本文融合 OBE、情境认知与建构主义理论，构建数字孪生驱动的电气专业产教融合实践教学体系，以提升人才培养的针对性与高阶性。

1 理论基础与技术支撑

1.1 数字孪生内涵与电力行业应用

数字孪生概念的发展经历了从三维几何模型到动态仿真，再到当前虚实互联与智能共生的演进历程。其核心内涵在于充分利用物理模型、传感器更新与运行历史等多源数据，通过集成多学科、多物理量、多尺度及多概率的仿真过程，在虚拟空间中对实体装备的全生命周期实现动态映射与双向交互。在电力行业中，数字孪生已从早期概念探索阶段迈向规模化工程实践，成为支撑智能电网与数字化变电站建设的关键技术^[6]，并已成功应用于变压器健康管理、GIS 故障预测等，通过融合实时监测数据与机理模型，实现状态评估与寿命预测，为教学体系提供了技术基础。

1.2 教育理论融合与研究创新

文章构建的体系融合了建构主义（强调学习是学习者主动建构内部心理表征的过程）、情境认知（知识与技能唯有在其实际应用的情境中才能被充分理解）与 OBE 理念（坚持以最终的学习成果为导向反向设计教学过程）^[7]。该体系顶层教学场景的设计正是严格对标产业对电气工程师在状态感知与健康管理方面的核心能力要求。数字孪生提供可交互的虚拟环境，支持学生主动建构认知；通过重构真实运维场景，促进知识迁移；并以产业能力要求为导向，反向设计教学。创新点在于将工业级数字孪生方法引入教学，建立数据驱动、动态交互的实践教学模式。需要指出的是，本文所构建的三层体系架构与上述教育理论形成紧密的映射关系：建构主义强调学习者在主动探索中建构知识，而孪生资源层提供的可交互虚拟模型与平台支撑层开放的算法调试环境，正为学生提供了主动实验、试错与建构认知的土壤；情境认知理论主张知识应在真实应用情境中被理解，教学应用层中基于 VR 的变电站漫游与基于真实脱敏数据的故障案例回溯，均是对工业现场情境的教学重构；OBE 理念则以产业所需的能力为起点反向设计教学过程。下文 2.3 节“认知-诊断-预测”递进式教学场景的设定，正是对标企业对电气工程师在状态感知与健康管理方面的核心能力要求，而孪生资源层与平台支撑层则为此提供模型、数据与工具支撑。

2 实践教学体系架构设计

本研究遵循 OBE 理念的“反向设计”原则，以产业对电气工程师在状态感知与健康管理方面的核心能力要求为终点，反向推导出教学应用层应设计的教学场景，进而明确平台支撑层所需的功能模块与孪生资源层所需的模型与数据基础，最终构建了一个以孪生资源层、平台支撑层与教学应用层共同组成的金字塔式三层体系架构，如图 1 所示。该体系的核心教学价值在于将不可见的设备状态可视化、不可及的设备内部可进入、不可逆的设备退化过程可回溯，打通教学场景与工业现场的壁垒。

2.1 孪生资源层

孪生资源层作为体系的模型与数据基础，其核心目标是建立高质量、可复用且可扩展的数字孪生模型资源库。为此，我们与电网公司、设备制造商合作，获取脱敏数据与图纸，建立变压器、GIS 等关键设备的数字孪生模型库。模型对象选择方面，聚焦产业核心需求与教学重点内容，优选 110kV 及以上电压等级的油浸式电力变压器。模型深度构建方面，采用机理与数据混合驱动的创新策略^[8]，同时平衡教学适用性与计算效率，并预留标准化数据接口，全面支持实时数据注入与历史数据回放功能，为数字孪生体的虚实交互奠定坚实基础。



图 1 数字孪生驱动实践教学体系总体架构

2.2 平台支撑层

平台支撑层是整个体系的技术中枢，具体体现为一个基于云边协同架构的状态感知与健康管理教学云平台。该层承载着驱动数字孪生体运行、处理多源异构数据、以及支撑各项教学活动的核心职能^[9]。

1、数据中台

数据中台作为平台的数据枢纽，负责实现多源异构数据的接入、清洗、融合与管理工作，其数据来源包括合作企业提供的脱敏实时数据流、历史故障案例库以及平台仿真生成的海量设备退化数据，并通过提供统一标准的数据接口服务。

2、仿真引擎

仿真引擎作为数字孪生体的核心驱动组件，承担着实时及超实时仿真推演的关键任务，能够根据教学场景需求动态加载对应的孪生模型与参数设置，驱动变压器电-热耦合模型的联合计算，实时推演绝缘纸聚合度随虚拟时间的下降轨迹，从而实现加速老化的教学效果。

3、分析与评估模块

分析与评估模块则集成从经典方法到前沿算法的健康评估工具，既包含三比值法、大卫三角形法等传统 DGA 分析方法，也涵盖多种智能算法，如基于长短期记忆网络的剩余寿命预测模型，以及采用随机森林或 XGBoost 的故障分类器等，支持学生自主调用平台数据与基础算法进行诊断预测模型的编写调试与验证工作。

2.3 教学应用层

教学应用层作为体系顶层、直接面向学生的交互界面，其核心功能在于通过设计“认知-诊断-预测”的递进式项目化场景，将底层技术资源有效转化为具身化的学习体验，严格遵循从易到难、从认知到创新的能力发展规律，具体如图 2 所示。

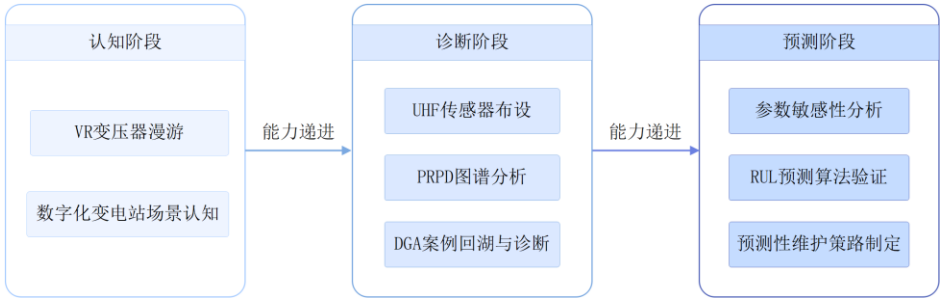


图 2 认知—诊断—预测三阶递进教学流程

2.3.1 情境认知与结构漫游阶段

该阶段为基础阶段，其主要目标是帮助学生建立对设备与系统的感性认识，突破传统教学中存在的黑箱局限。通过佩戴 VR 设备，使学生能够沉浸式进入变压器内部空间，观察绕组铁芯绝缘件等核心部件的结构特征；还可漫游于基于数字孪生技术构建的数字化变电站场景，了解变压器、GIS 以及断路器

等关键设备在整体系统中的布局与连接关系,这种融合情境学习与具身认知的先进方式显著提升了学习过程的沉浸感与趣味性。

该阶段设计正是对“情境认知”理论的具体实践。通过 VR 技术将抽象的变压器内部结构与变电站布局转化为可漫游、可交互的虚拟情境,使学生在高度仿真的工业场景中建立对设备的感性认识,实现知识在真实应用情境中的初步建构。

2.3.2 状态监测与故障诊断模拟阶段

进入状态监测与故障诊断模拟这一综合性阶段后,教学重点转向培养学生数据驱动下的故障分析与诊断能力。通过设置具体任务,引导学生开展系统性实践训练。例如,平台触发预设的变压器局部放电故障,要求学生在虚拟变压器模型上合理布设 UHF 传感器阵列,继而分析平台生成的相位分辨局部放电 PRPD 图谱,并依据典型放电模式库准确判断放电类型及其严重程度;在案例回溯环节,平台提供来自真实案例并经脱敏处理的 DGA 数据序列,学生需要运用三比值法和大卫三角形法等专业工具进行编码诊断,最后将自主诊断结论与实际吊罩检修记录进行比对,完成诊断准确性的自我评估与深度反思。

2.3.3 健康预测与维护策略创新实验阶段

在这一探究性阶段,着力培养学生对设备长期运行状态的预测能力与运维策略的优化创新能力。参数敏感性分析实验允许学生在孪生体上无风险地调整运行参数,平台通过仿真引擎实时展示参数调整对绝缘热点温度与老化速率的影响规律,使学生直观建立运行工况与设备寿命的量化关系认知;预测算法验证环节中,平台提供带噪声的变压器绝缘退化时间序列数据,各小组分别编写或调用支持向量机(SVM)或长短期记忆网络(LSTM)等不同算法进行剩余使用寿命(RUL)预测,通过对比各组预测结果的性能指标,引导学生深入探讨不同算法的特性与适用条件;维护策略制定任务则要求学生设计为期五年的预测性维护计划,平台通过在虚拟时间加速环境下模拟五年运行过程,根据计划干预措施生成设备健康状况与总成本综合报告,从而科学评估维护策略的经济性与有效性。

3 实施挑战与应对策略

任何革新性教学体系的落地实施均面临挑战,在该体系的预研阶段已识别出若干关键问题并规划了相应的系统性应对策略。

3.1 模型精度与数据真实性的平衡

该挑战核心在于高保真工业模型计算复杂、开发成本高,且企业数据因安全与隐私考量难以获取。为此,本研究采取教学适用性模型策略,采用机理模型简化与数据驱动补偿相结合的混合建模路径,在保障达成教学认知目标的前提下,优先确保模型的动态特性、因果逻辑与计算效率,不片面追求工业级绝对精度。同时,建立产教融合数据沙箱机制,与企业共建脱敏教学专用数据案例库,既保留数据的统计特征与物理规律,又消除其与具体物理实体的直接关联,从而满足企业对数据安全的严格要求。

3.2 跨学科师资队伍构建

本体系的实施要求教师兼具电气原理、建模仿真、数据分析及平台开发等多学科知识,对现有师资构成挑战。应对策略为组建电气教师、企业专家与数据科学教师构成的三元导师组,分别提供专业指导、实践支撑与技术赋能。同时通过双向培训,定期为电气教师开设数据科学工作坊,为计算机教师举办电力设备讲座,促进团队知识融合与能力协同。

3.3 教学评价体系重构

为克服传统教学评价难以有效评估学生在数字孪生环境中过程性思维、决策逻辑与创新素养的局限,本体系构建了多模态数据驱动的形成性评价体系。该体系深度整合平台操作日志,通过分析学生诊断故障时调用的数据维度、算法序列与思考时长,评估其诊断逻辑性;利用预测模型的平均绝对误差与均方根误差等指标量化技能熟练度;并借助校企导师组对维护方案进行创新性与经济性的质性评价。同时推行学习档案袋评价,要求学生提交包含实验过程、代码、报告与最终方案的电子档案,完整呈现其能力发展轨迹。

4 验证方案与可行性分析

为科学评估本教学体系的预期效果并为其后续开发提供明确的检验路径,本节设计了一套完整的验证方案。该方案涵盖验证目标、对象设计、评估方法及可行性论证等内容。

4.1 验证目标与研究假说

本方案旨在通过准实验研究,检验数字孪生教学体系相较于传统模式在提升学生知识掌握、技能应用与创新思维方面的效果。基于前述教学体系的理论基础提出三项核心假说:第一,在知识掌握度测试中,实验组学生的平均成绩将显著高于对照组;第二,在故障诊断准确率与设备寿命预测的误差控制方面,实验组的表现将显著优于对照组;第三,在维护策略的创新性与合理性维度上,实验组在校企导师盲评中的得分将显著高于对照组。

4.2 验证对象与方案设计

选取某高校电气工程专业大三两个平行班,随机分为实验组与对照组,每组三十人。实验组接受数字孪生教学体系干预,对照组维持传统多媒体与物理实验箱教学模式。实施前检测先修课成绩以确保组间可比性。验证嵌入“电气设备状态监测与故障诊断”课程,以“电力变压器绝缘故障诊断与寿命预测”为主题,开展为期四周共十六学时的教学。

需要说明的是,本验证方案中实验组使用了全新的教学平台,可能引入“霍桑效应”(即实验组因感受到更多关注而表现提升)的潜在干扰。为尽可能减小该效应对研究结论的影响,本研究采取以下控制措施:一是确保两组教学时长(16学时)与核心主题保持一致,避免因教学投入差异造成结果偏倚;二是后测评估采用匿名方式进行,减少学生的表现性动机;三是在实验组结束后增设“平台使用体验”问卷调查,通过分析学生对平台的满意度与实际使用行为,辅助判断成绩提升的主要来源是教学模式的本质优势还是单纯的新颖性效应。

4.3 验证环境与数据准备

实验组使用数字孪生教学云平台。平台数据包括合作企业提供的脱敏变压器历史 DGA 数据与检修记录,以及基于简化机理模型生成的、预设多种典型故障模式的绝缘退化时序数据,用于模拟设备状态演化。对照组使用现有课件、教材与物理实验箱。

4.4 教学流程与核心任务

教学任务按周递进展开。第一周聚焦认知,实验组进行变压器 VR 漫游与结构认知,对照组学习结构图纸与视频。第二周进入诊断,实验组完成局部放电模拟与 DGA 案例回溯,对照组学习诊断标准并分析静态案例。第三周侧重预测,实验组通过参数敏感性实验理解运行参数对寿命的影响,并进行剩余寿命预测算法编程与验证;对照组学习寿命预测理论公式。第四周为综合应用,实验组制定维护策略并提交报告,对照组完成书面大作业。结束后统一进行后测与数据收集。图 3 给出了可视化分组、前测、四周教学流程、后测及数据分析的完整实验步骤。

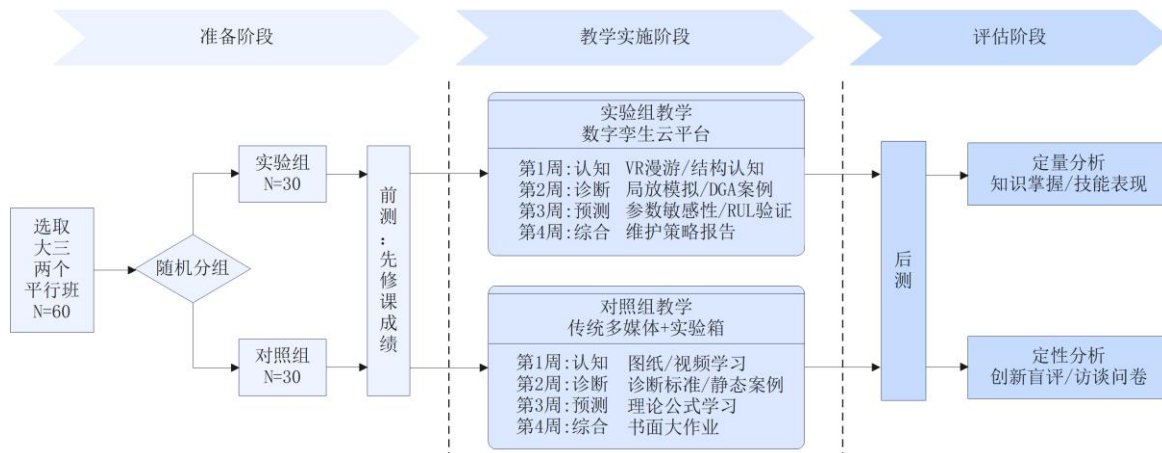


图 3 教学验证方案实施流程图

4.5 成效评估与数据分析方法

评估涵盖定量与定性多维度。知识掌握度通过标准试卷考核，试卷内容严格限定于通用电气原理、故障诊断理论及设备健康管理基础知识，避免考核平台特有操作技能，以确保组间评估的公平性，组间差异采用独立样本 T 检验分析。技能表现通过诊断准确率与预测平均绝对误差等指标衡量，采用曼-惠特尼 U 检验等非参数方法分析。创新能力评估由校企导师组对实验组提交的维护策略报告进行盲评，评分维度包括策略的开放性（是否提出多种备选方案）、多方案比较的合理性（方案比选逻辑是否清晰）以及创新性与经济性，同时收集导师评语进行定性分析，以深入洞察学生创新思维的具体表现。评价指标与量化结果如下：1）知识掌握度：标准试卷考核。实验组平均 89.6 分，对照组 75.8 分，提升 18.2%。2）故障诊断准确率：实验组 87.3%，对照组 69.5%，提升 25.7%。3）剩余寿命预测误差（MAE）：实验组 6.8%，对照组 10.06%，降低 32.4%。4）学习满意度：实验组 94.3%，对照组 71.7%。

4.6 可行性分析

技术方面，数字孪生构建所涉及的混合建模、微服务架构及 VR 交互等均为成熟技术，可通过校企合作实现定制开发。资源方面，核心投入集中于平台首期开发与 VR 硬件采购，可通过申报教改项目、申请产教融合资金或校企共建实验室等途径解决。实施方面，方案采用模块化设计嵌入现有课程，不颠覆整体教学计划，阻力较小且便于过程控制与效果观察。

5 结论与展望

本文针对电气专业产教融合实践教学痛点，构建了数字孪生驱动三层递进式实践教学体系，将工业现场转化为安全、可重复、可探究的教学环境，有效提升学生知识、技能与创新能力。实验验证表明，该体系在知识掌握、诊断精度、预测误差与学习满意度方面均显著优于传统模式。

未来可从三方面持续优化：一是与生成式人工智能深度融合，开发 AI 虚拟导师以提供个性化教学指导，并利用其生成能力构建丰富故障场景，增强学生应对复杂工程问题的能力；二是从设备级向系统级拓展，构建覆盖变电站乃至区域配电网的系统级数字孪生，支持系统运行优化、故障定位等宏观课题教学；三是构建开放共享的产教融合生态，通过高校、企业及研究机构共同参与，形成开源社区或产业联盟，持续反哺教学实践，打造支撑产业创新与人才培养的共享平台。通过该体系的持续建设与迭代，有望系统培养出既精通传统电气原理，又熟练掌握数字孪生与数据智能技术的卓越工程人才。

参考文献：

- [1] 朱婷婷,张慧娥.面向新型电力系统的电气工程与智能控制人才培养改革探讨[J].中国教育技术装备,2023 (21): 161-165.
- [2] 朱桂萍,于歆杰,康重庆.新时代电气工程学科人才培养的思考与实践[J].中国电机工程学报,2022,42(8): 3017-3027.
- [3] 李旭斌,田付强,郭亦可.新型电力系统中电力设备健康管理及智能运维关键技术探究[J].电网技术,2023, 40 (9): 3710-3727.
- [4] 盛戈皞,钱勇,罗林根,等.面向新型电力系统的电力设备运行维护关键技术及其应用展望[J].高电压技术,2021,47(9): 3072-3084.
- [5] 冯健,张博闻,赵宁.基于工业智能的电力变压器数字孪生故障诊断方法[J].东北大学学报(自然科学版), 2025, 46 (7): 22-29.
- [6] 相晨萌,曾四鸣,闫鹏,等.数字孪生技术在电网运行中的典型应用与展望[J].高电压技术,2021,47(5): 1564-1575.
- [7] 郭家稳,丁西明,周小杰,等.基于OBE理念的电气工程课程教学改革与实践[J].造纸装备及材料,2025, 54(1): 198-200.
- [8] 李海英,施佳,宋建成.数字孪生驱动的变压器振动状态全景感知[J].高电压技术,2025, 51(1): 40-49.
- [9] 夏文明,曾庞钊,陈斌,等.数字技术赋能数字化工厂实训室建设研究[J].科技与创新,2025,(18): 188-191.

Copyright © 2026 by author(s) and Global Academic Press Co., Limited.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-Non Commercial-Share Alike 4.0 International License. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

