

# 基于数字孪生的工程机械液压系统故障诊断 教学设计新路径

张昆伦, 张金利, 刘君, 周广星

高新技术研究所, 山东 青州

收稿日期: 2026年4月21日; 录用日期: 2026年5月21日; 发布日期: 2026年5月28日

## 摘要

在工程机械数智化转型背景下, 液压系统故障诊断因机理复杂、实训受限、技能迁移难成为高等职业教育教学中的核心痛点。本文以TPACK模型和沉浸理论为支撑, 创新构建“机理可视化建模-梯度化故障仿真-虚实闭环交互-多维精准评价”四阶教学设计框架。创新数字孪生实训平台, 设计“认知-实践-内化-提升”分层任务体系。该思路为破解传统教学“机理难可视化、故障难复现、能力难量化”困境, 提供了可复制、可推广的新路径。

## 关键词

数字孪生, 工程机械, 液压系统, 故障诊断, 教学设计

# A New Teaching Design Path for Fault Diagnosis of Construction Machinery Hydraulic Systems Based on Digital Twin

Kunlun Zhang, Jinli Zhang, Jun Liu, Guangxing Zhou

High-Tech Research Institute, Qingzhou Shandong

Received: April 21, 2026; accepted: May 21, 2026; published: May 28, 2026

## Abstract

Against the backdrop of the digital and intelligent transformation of construction machinery, fault diagnosis of hydraulic systems has emerged as a core challenge in higher vocational education, primarily due to its complex mechanisms, limited hands-on training opportunities, and difficulties in

skill transfer. Guided by the TPACK model and immersion theory, this paper innovatively constructs a four-stage teaching design framework, namely “mechanism visualization modeling, gradient fault simulation, virtual-real closed-loop interaction, and multidimensional precise evaluation”. A digital twin-based practical training platform is developed, accompanied by a hierarchical task system structured as “cognition - practice - internalization- advancement”. This approach provides a replicable and scalable solution to address the long-standing teaching dilemmas in conventional education, including “difficult-to-visualize mechanisms, hard-to-reproduce faults, and unquantifiable competencies”.

## Keywords

Digital Twin, Construction Machinery, Hydraulic System, Fault Diagnosis, Teaching Design

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

液压系统作为工程机械的“动力心脏”，承担着动力传递、动作控制等核心功能，其故障诊断技能直接决定学生的职业竞争力[1]。据《工程机械维修工国家职业技能标准》<sup>1</sup>统计，液压系统故障占工程机械总故障的42%以上，且故障类型呈现“多因素耦合、隐蔽性强、演化速度快”的特点[2]。当前高职液压系统故障诊断教学面临三重突出困境：一是实训资源约束，全断面隧道掘进机(TBM)、挖掘机等大型设备单台价值超千万元，院校难以配备足量实训设备，且真机故障复现易造成设备损坏，导致学生接触的故障场景不足实际工况的15% [3]；二是机理认知障碍，液压油流态、压力波动、阀组动作协同等内部机理无法通过传统教具直观呈现，学生只能通过二维图纸和教师口述进行抽象理解，知识内化效率低；三是个性化培养缺失，学生在机械基础、电气知识、动手能力等方面存在显著差异，但传统“一刀切”教学模式难以适配个体需求，导致基础薄弱学生跟不上、能力较强学生“吃不饱”。

随着工业4.0与职业教育数字化转型的深度融合，数字孪生技术凭借“虚实映射、实时交互、全生命周期模拟”的核心特性，成为破解上述困境的关键技术支撑。国际上，数字孪生在职业教育的应用已经形成体系。德国西门子公司开发的“Digital Twin for Education”平台，实现了从设备设计、装配到故障维修的全流程虚拟实训，经德国巴登-符腾堡州职业院校的实践数据显示，学生技能达标率从68%提升至89%，提高幅度达31% [4]；美国普渡大学针对液压系统教学开发的数字孪生仿真模块，通过1:1还原设备内部流场与压力变化，使学生对“泵阀协同故障”的认知准确率提升53% [5]；英国曼彻斯特大学则基于沉浸理论优化虚拟实训场景的交互设计，通过触觉反馈装置与动态难度调节机制，使学生学习沉浸度保持在8.2分(满分10分)的高水平[6]。这些研究形成了“技术赋能-理论支撑-实验证-标准输出”的完整闭环，为专业教学改革提供了重要参考。

国内研究近年来呈现快速发展态势，但仍存在明显短板：在技术应用层面，温晓东、李凯等人聚焦数字孪生在机械类专业的宏观布局，证实了技术对教学资源的拓展价值，但缺乏针对液压系统故障诊断的专项开发[7]；在教学实践层面，浙江工业职业技术学院、深圳职业技术学院等院校搭建了虚实融合实训平台，但方案多侧重设备硬件搭建，对教学逻辑重构、任务体系设计、评价机制优化等核心环节挖掘不足[8]；在理论支撑层面，杨宗凯团队系统梳理了人工智能与职业教育融合的整体路径，朱德全团队基于TPACK

<sup>1</sup><https://chinajob.mohrss.gov.cn/upload/resources/jnbzpdf/4ccc6a76ab911f4041391c.pdf>

模型开发了技术融合框架,但两者均未针对液压系统故障诊断的技能形成规律进行本土化适配[9]。与国外“技术-教学-评价”深度耦合的研究相比,国内现有成果存在“重技术应用、轻教学创新,重宏观探索、轻专项突破”的问题,针对液压系统故障诊断的数字孪生专项教学设计与实证研究尤为匮乏。

本文以工程机械液压系统为研究载体,以TPACK模型和沉浸理论为双重支撑,创新构建四阶教学设计框架,通过联合企业开发专项维修实训平台、设计分层任务体系,旨在解决传统教学的核心痛点,弥补国内专项研究的短板,为高职工程机械维修专业核心技能的智能化教学提供理论支撑与实践参考。

## 2. 理论基础

### 2.1. TPACK 模型

TPACK (Technological Pedagogical Content Knowledge)模型:该模型由Mishra和Koehler提出,核心在于实现技术(Technology)、教学法(Pedagogy)与学科内容(Content)的有机融合。在本研究中,数字孪生技术作为核心技术要素,不仅是教学工具,更是重构教学流程的关键载体;液压系统故障诊断的学科内容(如液压回路原理、故障树分析方法、行业维修规范)是教学核心;任务驱动法、分层教学法、反思性教学法则是实现技术与内容深度融合的桥梁。三者形成“技术赋能内容、教学法适配需求”的三位一体逻辑,确保了数字孪生技术应用不脱离教学本质与专业需求。

### 2.2. 沉浸理论

沉浸理论:由Csikszentmihalyi提出,其核心观点是当个体面临的挑战与自身技能水平相匹配时,会进入“沉浸状态”,表现为注意力高度集中、学习主动性强、技能内化效率高的特点。本研究中,通过数字孪生平台的可视化呈现来降低认知层面的难度,通过梯度化任务设计来匹配学生技能水平,通过实时反馈机制来强化学生学习体验,使学生在故障诊断过程中持续处于“挑战适度、反馈及时、目标清晰”的沉浸状态,进而提升学习效果。

## 3. 创新四阶教学设计框架

液压系统故障诊断技能的形成遵循“认知-实践-内化-提升”的渐进式规律,而数字孪生技术的“虚实映射、动态仿真、全要素交互”特性,恰好能够适配职业教育中“抽象机理具象化、有限资源拓展化、个体差异精准化”的教学需求。基于此,本研究耦合技能形成逻辑与技术应用特性,创新构建“机理可视化建模-梯度化故障仿真-虚实闭环交互-多维精准评价”四阶教学框架,旨在实现技术赋能教学、流程适配认知、评价驱动提升的协同效应。以下从核心内涵、创新维度及实施路径三个层面,对各阶段进行系统阐释:

### 3.1. 机理可视化建模阶段(认知层)

在工程装备教学领域,传统建模方法多聚焦于零部件的“可见物理结构”,难以直观呈现系统内部运行机理与参数动态,导致学生对“结构-机理-现象”的关联认知存在割裂。本阶段核心内涵是以数字孪生技术为核心支撑,突破传统建模的局限性,实现“零部件结构可视化+内部机理动态化+参数变化直观化”的三重信息呈现,其核心目标是帮助学生建立多维度、动态化的系统认知体系,为后续实践操作与故障诊断能力培养奠定认知基础。

本阶段的创新特征主要体现在技术融合与功能设计两个维度:其一,采用“三维建模+流体仿真”双技术耦合方案,基于某主流挖掘机液压系统的120余个核心零部件(含液压泵、电磁阀、油路管道等)的真机几何与物理参数,通过三维建模技术还原其1:1高精度物理结构;同时引入CFD(计算流体力学)技

术, 依托 Fluent 仿真平台实时解算并可视化呈现液压油的流态分布、压力梯度、温度场变化等不可见运行参数, 实现“结构-过程-参数”的同步映射。其二, 设计“正常工况-故障工况”对比交互模块, 预设溢流阀堵塞、油路泄漏等典型故障工况的参数阈值, 学生可通过一键切换功能, 观测同一系统在不同工况下的油流轨迹、压力波动等参数差异, 快速建立故障外在现象与内部机理的因果关联。

具体实施路径如下: 首先, 基于目标挖掘机液压系统的真机数据, 采用 Photogrammetry 技术完成全维度几何与物理信息采集, 通过点云拼接与模型优化, 构建高精度数字孪生三维模型; 其次, 将模型导入 Fluent 仿真环境, 设置边界条件与初始参数, 完成液压系统的流场、压力场、温度场仿真计算, 并将仿真结果转化为动态彩色云图、矢量流线等直观可视化形式; 最后, 开发 Web 端交互式操作界面, 集成模型拖拽、局部缩放、截面剖切等功能, 支持学生自主调控观察视角与参数显示维度, 实现对系统结构与运行机理的沉浸式探索。该模型的建立既可有效解决传统教学中“抽象机理难感知、动态过程难复现、故障关联难建立”的痛点, 为工程装备类课程的认知层教学提供了技术赋能的新范式。

### 3.2. 梯度化故障仿真阶段(实践层)

在工程装备维修实践教学中, 传统故障实训常因场景单一、难度跳跃、过程不可控等问题, 难以适配不同基础学生的能力成长规律。本阶段核心内涵是以“能力分层递进”为核心导向, 基于行业高频故障类型, 构建“单一故障→复合故障→应急故障”的梯度化实训场景, 实现故障参数可调、现象可复现、演化可追溯, 其核心目标是匹配不同基础学生的技能成长节奏, 逐步提升其故障诊断与处置能力。

本阶段的创新特征主要体现在场景设计与任务适配两个维度: 其一, 故障场景“源于工业、高于工业”, 整合 50 余种工程机械液压系统高频故障案例(涵盖液压泵磨损、电磁阀卡滞、油路泄漏等典型类型), 既保证场景的工业真实性, 又通过“参数可调”功能实现故障程度的动态调控(如学生可自主调整泄漏量、磨损率等参数), 观测故障从“轻度异常”到“严重失效”的演化规律, 突破传统实训“故障状态固定”的局限; 其二, 任务设计“适配认知、循序渐进”, 依据技能形成的“感知-认知-应用”规律, 将实训任务与学生能力层级精准耦合: 单一故障场景聚焦“故障现象与机理的对应识别”, 复合故障场景侧重“多故障的关联分析与定位”, 应急故障场景强化“故障处置的时效性与合理性”, 避免传统实训“难度跳跃”导致的学习挫败感。

具体实施路径如下: 首先, 基于故障树分析法(FTA)构建液压系统故障层级模型, 明确单一故障(如单向阀堵塞)、复合故障(如液压泵磨损+油路泄漏)、应急故障(如主阀卡滞+过载保护失效)的因果逻辑与演化路径; 其次, 开发故障仿真引擎, 集成故障场景一键生成、参数实时调整、运行现象同步可视化功能, 支持学生在虚拟环境中模拟不同故障状态下的系统响应; 最后, 配套设计“故障诊断引导手册”, 提供差异化支持策略: 为基础薄弱学生配置“机理提示-现象关联”的阶梯式引导, 为能力较强学生设置“故障拓展-多方案对比”的深度思考任务, 实现“分层教学、精准赋能”。该梯度化故障仿真阶段的实施, 既有效解决了传统故障实训“场景脱离工业实际、能力培养缺乏梯度”的痛点, 又可显著提升学生故障诊断的系统性与灵活性。

### 3.3. 虚实闭环交互阶段(内化层)

传统工程装备实训存在“虚拟场景与真实设备脱节、实操试错成本高、经验沉淀难复现”的核心矛盾, 本阶段核心内涵是以“虚实联动、闭环迭代”为核心逻辑, 创新搭建“虚拟仿真试错-真机验证应用-数据反馈优化”的闭环教学流程, 其核心内涵是通过虚拟场景与真实设备的深度耦合, 实现虚拟机低风险试错与真机高价值应用的有机衔接, 推动技能从认知模仿向深度内化跃迁。

本阶段的创新点体现在两个维度: 其一, “虚实双向映射”的技术衔接。可依托 OPC UA 工业数据

交互标准，建立虚拟仿真平台与真机测试台的实时数据链路：学生在虚拟场景中制定的故障诊断方案可直接同步至真机系统验证效果，而真机运行过程中的压力、流量、温度等参数也能实时反馈至虚拟平台，实现“虚拟诊断-真机验证-仿真对比”的全流程数据互通，突破传统虚实实训“信息割裂”的局限；其二，“试错-验证-反思”的能力闭环。学生可在虚拟场景中无风险重复模拟故障诊断操作，积累经验后再进行真机实操，最后基于平台采集的“虚拟试错轨迹”“真机操作数据”完成流程复盘与优化，解决了传统实训“一次操作、难以复盘”的痛点，实现技能经验的可沉淀、可迭代。

具体实施路径为：首先，改造闲置挖掘机液压系统搭建真机测试台，加装压力、流量、温度传感器及数据采集模块，实现设备运行参数的实时、高精度采集；其次，开发虚实联动接口，完成虚拟仿真平台与真机测试台的通信协议适配，支持诊断方案同步、运行数据反馈、操作流程对比等功能；最后，配套设计“虚拟试错记录单”“真机验证报告”“反思优化日志”三类工具，引导学生系统性记录虚拟试错中的问题、真机验证的结果及流程优化的方向，推动技能经验的结构化内化。

### 3.4. 多维精准评价阶段(提升层)

传统工程装备实训常存在维度单一、数据主观、反馈模糊等问题，难以支撑学生能力的精准提升。本阶段核心内涵是以“全维度、过程化、个性化”为评价导向，构建“知识掌握-技能操作-思维发展-态度表现”的四维评价体系，其核心内涵是通过数字孪生平台采集过程性数据，结合多元评价方法生成可视化能力雷达图，实现精准化评价与个性化反馈，为学生能力提升与教学优化提供数据支撑。

本阶段的创新点体现在三个方面：一是评价维度“全面覆盖”，突破传统评价的局限，将工程思维(如故障分析的逻辑性)、自主学习(如试错后的方案迭代能力)、安全意识(如操作流程的规范性)等隐性素养纳入评价体系，实现“知识-技能-素养”的全维度考察；二是评价数据“客观可追溯”，依托数字孪生平台的行为记录功能，自动采集学生操作轨迹、诊断时长、参数调整次数、方案修改频率等12项过程性指标，替代传统评价中的主观打分，保证评价结果的客观性与可验证性；三是反馈方式“个性化精准”，基于学生的四维能力数据生成可视化雷达图，明确其知识薄弱点、技能短板及素养盲区，并匹配针对性的提升建议(如针对“故障关联分析不足”的学生推荐复合故障拓展训练)，实现评价从结果判定向能力赋能的转变。

具体实施路径为：首先，制定四维评价指标体系见表1，明确各维度的评价内容、数据来源与权重

Table 1. Four-dimensional evaluation index system

表 1. 四维评价指标体系

评价维度	核心指标	评价内容	评价方式	权重
知识掌握	理论测试成绩	液压原理、维修规范等理论知识掌握程度	闭卷测试	20%
	故障机理认知准确率	对故障现象与内部机理对应关系的理解程度	平台答题数据	10%
技能操作	故障定位准确率	快速精准识别故障点的能力	虚拟 + 真机实训数据	25%
	操作规范度	工具选用、流程执行、安全操作等符合行业规范的程度	平台操作记录 + 教师评分	15%
	任务完成效率	故障诊断与维修的耗时	平台计时数据	10%
思维发展	工程思维得分	系统分析、逻辑推理、方案优化等能力	案例分析 + 小组答辩	10%
态度表现	学习参与度	平台学习时长、任务完成率、主动提问次数	平台数据 + 课堂记录	5%
	安全意识	安全操作规范遵守情况	平台安全操作记录	5%

分配；其次，开发评价分析引擎，实现平台过程性数据与人工评分的自动整合、量化计算；最后，生成“个人能力雷达图”与“班级整体分析报告”，既为学生提供个性化提升路径，也为教师优化教学内容与方法提供数据依据。

## 4. 研究局限性与展望

### 4.1. 研究局限性

受技术成本约束显著：数字孪生实训平台的开发涉及三维建模、实时数据交互、虚实映射等技术模块，其初期为硬件服务器和专业软件授权及年度运维成本(数据存储、系统迭代)投入较高，对于地方应用型院校、经费紧张的职业院校而言，直接复刻现有方案的经济门槛较高；而课题组尝试的低成本简化方案，因压缩了模型精度与交互功能，存在设备工况模拟不充分、故障场景覆盖不全等问题，功能完整性与教学有效性的平衡仍需优化。

评价体系精准度不足：现有评价指标以知识掌握度、操作熟练度等“硬技能”为主，对创新思维(如故障排查的方案创新性)、团队协作(如任务分工的合理性)等“软技能”的量化维度缺失；同时，教学过程中产生的操作轨迹、讨论记录等过程性数据，仅实现了基础存储而未进行深度挖掘(如通过行为序列分析学生的思维误区)，难以支撑“因材施教”的精准化反馈，评价结果的全面性与指导性有待提升。

### 4.2. 未来研究方向

低成本方案的功能-成本协同优化：基于模块化设计理念，拆分数字孪生平台的核心功能(如设备结构可视化、基础故障模拟)与拓展功能(如多场景并行仿真)，在简化模型复杂度的同时保障核心教学需求；探索“校企联合开发+区域职教集团共享”的建设模式，由企业提供技术支撑、院校分摊运维成本，降低单个院校的投入压力；同步开发移动端轻量化版本，适配手机、平板等终端，支持碎片化学习与远程实操练习，提升教学场景的灵活性。

多维度评价体系的构建与落地：引入区块链技术实现过程性数据的不可篡改存储，结合学习分析技术(Learning Analytics)构建“知识掌握-技能实操-素养发展”三维评价模型：其中知识维度采用客观题+实操考核量化，技能维度通过操作规范性、故障解决效率等指标评估，素养维度则基于团队协作日志、创新方案提案等数据，设计熵权法-层次分析法(EWM-AHP)组合权重的量化指标；配套开发智能导学系统，基于评价数据自动识别学生的能力短板，推送个性化学习资源(如薄弱知识点微课、同类故障案例库)。

多系统融合的综合实训体系拓展：将数字孪生技术延伸至工程机械的电气系统、底盘传动系统、智能控制系统等子系统，构建多系统虚实映射模型；开发跨系统协同故障诊断模块，模拟“电气故障引发底盘运行异常”等复合工况，设计阶梯式实训任务(从单一系统故障排查到多系统协同维修)，培养学生的系统思维与综合运维能力；同时接入工业互联网平台的真实设备运行数据，实现“虚拟实训-真实工况数据验证”的闭环教学，提升实训内容与产业需求的契合度。

## 5. 结语

本文以TPACK模型和沉浸理论为双重支撑，创新构建“机理可视化建模-梯度化故障仿真-虚实闭环交互-多维精准评价”四阶教学设计框架，通过开发专项数字孪生实训平台、设计分层任务体系可有效破解传统教学中“机理难可视化、故障难复现、能力难量化”的三重困境。该设计在提升学生故障诊断技能、培养高阶能力、改善学习态度等方面均取得显著效果，尤其是在复合故障与应急故障处置能力培养上优势突出。

未来，需进一步优化技术应用成本与评价体系，开展样本研究验证，拓展多系统融合教学，开展长

期跟踪研究, 推动该教学设计在更多高职院校的实践应用, 为职业教育核心技能教学的智能化、精准化改革提供更坚实的支撑。

### 参考文献

- [1] 王世明. 工程机械液压系统故障监测诊断技术的现状和发展趋势[J]. 机床与液压, 2009, 37(2): 175-180+198.
- [2] 张开庆. 基于数字孪生的启闭机构液压系统故障诊断[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2024.
- [3] 梁迪, 李又佳, 李依明, 等. 数字孪生驱动的数控车床主传动系统故障诊断研究[J]. 机床与液压, 2024, 52(10): 215-220.
- [4] Siemens, A.G. (2022) Digital Twin for Education: Transforming Vocational Training with Virtual Reality. Siemens Corporate Technology.
- [5] Wang, L.T., Liu, Y.C., Yin, H. and Sun, W. (2022) Fault Diagnosis and Predictive Maintenance for Hydraulic System Based on Digital Twin Model. *AIP Advances*, **12**, 065213. <https://doi.org/10.1063/5.0098632>
- [6] Ma, L.M., Jiang, B., Xiao, L.F. and Lu, N.Y. (2023) Digital Twin-Assisted Enhanced Meta-Transfer Learning for Rolling Bearing Fault Diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **200**, 110490. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110490>
- [7] 郭海奎. 人工智能在工程机械创新中的应用[J]. 集成电路应用, 2024, 41(3): 210-211.
- [8] 温晓东. 人工智能在机械制造设备故障诊断与维修中的应用[J]. 机械管理开发, 2024, 39(9): 310-313.
- [9] 浙江工业职业技术学院. 虚实融合技术在机械维修教学中的应用研究[J]. 中国职业技术教育, 2022(18): 78-83.