

“问题链 + AI” 驱动的《冶金传输原理》教学模式重构

——以高炉炉缸侵蚀为例

狄瞻霞*, 岳 强, 施晓芳, 周小宾

安徽工业大学冶金工程学院, 安徽 马鞍山

收稿日期: 2026年9月10日; 录用日期: 2026年10月20日; 发布日期: 2026年10月30日

摘 要

传统工科教学常陷入理论抽象、工程脱节、反馈滞后的三重困境, 在《冶金传输原理》等专业核心课程中尤为突出。虽然课程内容覆盖傅里叶定律等经典理论, 却往往与“高炉炉缸侵蚀”等真实工程问题相割裂, 学生难以实现从理论到工程应用的认知跃迁。为此, 本研究以认知学徒制与情境学习理论为依据, 提出“问题链 + AI工具”协同教学模式: 以高炉炉缸侵蚀为传热内容的工程案例, 设计“基础理论(一维稳态导热)→工程应用(炉缸炉底温度场分析)→深入探究(拐角部位温度分析)”的阶梯式问题链; 以知识图谱关联理论节点与工程案例, 构建系统化认知框架; 依托超星学习通平台的知识图谱与课堂测评模块实现自动组卷与即时反馈, 形成“问题激发 - 探究实践 - 优化”的教学闭环。两学期考核数据显示, 课程平均成绩由68.2分升至73.4分(+7.6%), 优秀率由4.35%升至9.46%, 增益主要发生在60分以上; 不及格率由14.49%微增至14.86%, 基本持平, 提示该模式更接近提升型干预, 而非面向学困生的补偿型干预。

关键词

问题链教学, AI工具, 知识图谱, 教学重构, 工程教育

Reconstruction of “Metallurgical Transport Principles” Teaching Model Driven by “Problem Chain + AI”

—Taking Blast Furnace Hearth Erosion as an Example

Zhanxia Di*, Qiang Yue, Xiaofang Shi, Xiaobin Zhou

*通讯作者。

文章引用: 狄瞻霞, 岳强, 施晓芳, 周小宾. “问题链 + AI”驱动的《冶金传输原理》教学模式重构[J]. 创新教育研究, 2026, 14(10): 864-871. DOI: 10.12677/ces.2026.1410853

Abstract

Traditional engineering education often faces challenges in connecting abstract theory with engineering practice and providing timely feedback. These challenges are particularly evident in core courses such as *Metallurgical Transport Principles*. Although students learn fundamental principles such as Fourier's law, they may struggle to apply them to authentic engineering problems, including blast furnace hearth erosion. Drawing on cognitive apprenticeship and situated learning theory, this study proposes a teaching model integrating a progressive problem chain with AI-assisted tools. Blast furnace hearth erosion serves as an engineering case for the heat transfer component. The problem sequence progresses from one-dimensional steady-state heat conduction to temperature-field analysis of the hearth and, finally, two-dimensional heat transfer analysis near the hearth corner. A knowledge graph connects theoretical concepts with engineering applications, while the knowledge graph and classroom assessment modules of the Chaoxing Learning Tong platform support automatic quiz assembly and immediate formative feedback. Assessment data from two semesters show that the mean course score increased from 68.2 to 73.4 (7.6%), and the proportion of students attaining excellent grades rose from 4.35% to 9.46%. The gains were concentrated among students scoring at least 60, whereas the failure rate remained essentially unchanged (14.49% versus 14.86%). This pattern suggests that the model may support improvement among students with an adequate foundation, while offering limited remedial benefit to lower-performing students.

Keywords

Problem Chain Teaching, AI Tools, Knowledge Graph, Course Reconstruction, Engineering Education

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

工程教育是培养国家卓越工程师、实现现代化强国建设的关键[1]。然而长期以来,我国高校工程人才培养重基础、轻应用,重知识、轻实践,如何让工程教育育“回归工程”[2],其核心在于解决传统工程教育中理论与实践脱节、知识传授与能力培养失衡的结构性矛盾。作为连接基础科学与工程应用的桥梁课程,《冶金传输原理》的教学改革需回应三个维度的时代挑战:一是冶金工业向智能化、绿色化转型对工程师系统思维的需求升级,要求课程从单一公式推导转向多物理场耦合问题的分析框架构建;二是教育认知科学的发展揭示,传统“讲授-练习”模式仅有不到20%的知识留存率,而基于AI可使知识转化率提升至70%以上[3];三是“双碳”目标下冶金过程强化对跨尺度传输理论的应用需求,倒逼教学内容从经典假设向复杂工业场景的迁移能力培养倾斜。这些挑战共同指向一个核心命题:如何通过教学模式创新,破解核心课程中理论抽象性与工程实践性之间的转化难题,实现从知识载体到能力孵化器的范式跃迁。

《冶金传输原理》作为冶金工程专业的核心课程，其理论体系以连续介质假设为基础，融合动量、热量与质量传输的复杂数学模型，对学生的抽象思维与工程转化能力构成双重挑战。传统教学模式暴露出以下三方面的矛盾。

1) 知识内化机制缺失。课程核心理论(如纳维-斯托克斯方程、傅里叶-柯西霍夫定律)的教学多停留在数学推导层面与记忆层面，缺乏与真实工程场景的深度链接，导致学生知识留存率低，“学完即忘”(遗忘率高)现象普遍。其根源在于理论概念与工程问题之间未能建立有效关联。

2) 能力培养脱节与迁移困难。传统教学中的课堂活动与作业任务集中于“记忆”和“理解”层面，涉及“应用”及以上高阶能力的训练严重不足，学生难以将理论知识迁移至实际冶金工艺优化、设备设计等复杂工程问题中。以高炉炉缸侵蚀问题为例，学生虽掌握导热微分方程，却在面对多物理场耦合的实际工况时，难以完成模型简化与边界条件设定，凸显从理论到工程的能力迁移障碍。

3) 教学反馈闭环滞后。心理学研究表明，认知过程中对学生正确认识的及时巩固与错误认知的及时矫正，有助于促进其形成稳定、准确的知识结构[4]。然而，传统作业批改存在3~5天的反馈延迟，可能导致错失认知矫正的最佳时机。此外，在大班授课条件下，教师难以实现对每位学生的持续关注与个性化指导，进一步制约了学习效果的提升。

针对上述矛盾，问题导向教学被视为一条可行路径。郝瀚[5]以“车用能源概论”课程为例，提出以主线问题牵引课程体系重构；李培根[6]指出工程教育需要从知识导向转向问题导向，重视问题空间的构建、知识节点之间的关联及学生问题解决能力的培养；高婷等[7]在新工科背景下探索了基于问题导向的课程教学模式。然而，这类模式在工程情境的持续供给与个性化指导的覆盖率上仍受限于师资规模，学生从理论到工程的迁移过程往往缺少过程性支持。

综上，已有研究分别验证了人工智能在工程教育中的多种功能形态[8][9]、计算机支架对问题驱动学习效果的支持作用[10]，并探讨了学生在问题探究中反思性使用生成式人工智能的过程[11]，及问题驱动学习在工程课程中的教学设计[12]，但仍存在两点不足：其一，现有研究多以通用STEM或医学教育为场景，结果变量多为通用认知结果或技术使用方式，对“学科理论向具体工程情境迁移”这一机制缺少过程性刻画；其二，Álvarez Ariza等[9]强调技术应用应结合课程目标与学习活动；在本课程中，如何围绕连续的工程问题组织理论学习，并在建模与分析过程中提供针对性反馈，仍需进一步探索。

《冶金传输原理》涉及动量、热量和质量传输的基本规律，理论性较强。学生在学习傅里叶定律、导热微分方程等内容时能够完成常规计算，但在实际工程问题中仍面临模型简化、边界条件确定及计算结果分析等困难。针对上述空白，本研究以认知学徒制[13]与情境学习理论[14]为依据设计教学模式。情境学习理论强调学习发生在真实实践情境之中，学习者经由“合法的边缘性参与”由外围逐步走向核心[14]；认知学徒制则主张通过建模、指导、搭建脚手架与逐渐淡出，使专家原本隐性的思维过程显性化[13]。据此，本研究以高炉炉缸侵蚀为工程情境，将一维稳态导热、炉缸炉底温度场分析和拐角区域二维传热组织为递进式问题链，对应学习者由边缘参与到独立建模的进阶路径；以知识图谱承载专家的知识组织结构，实现“建模”与“脚手架”功能；以AI辅助的自动组卷与即时反馈承担高频次的指导，而将学情判断与教学决策保留给教师，对应脚手架的“淡出”。在此框架下，本研究的理论贡献不在于提出新的学习理论，而在于将上述理论在具有明确行业情境的专业课程中操作化，并给出人工智能介入教学的边界条件。

2. 教学模式构建：“问题链 + AI”协同框架与实施路径

2.1. 问题链与AI的三维协同逻辑

本模式的核心逻辑在于，通过阶梯式问题链引导学生实现从知识理解到能力迁移的递进；利用结构

化知识图谱实现理论具象化与系统认知构建；借助 AI 工具提供支持与反馈，弥补传统教学的个性化与实时性短板。三者在教学目标、过程与评价三个维度形成系统性互补，其协同机制可通过三级耦合模型阐释(图 1)。

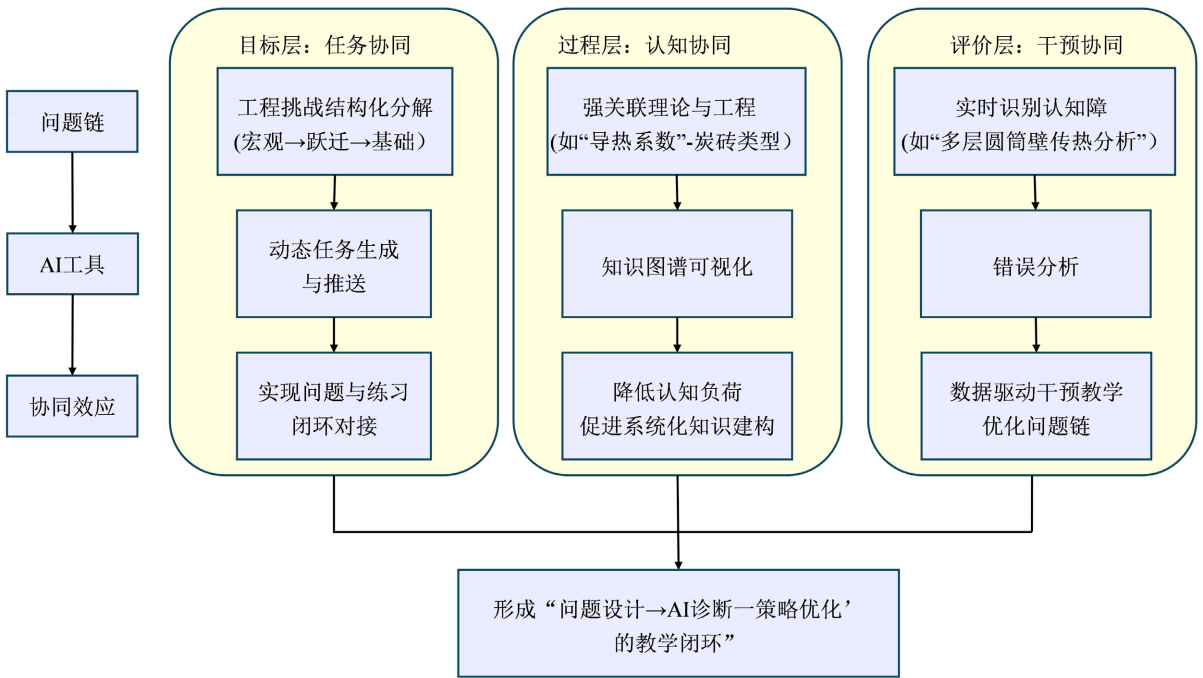


Figure 1. A three-dimensional collaborative framework for problem chains and AI tool instruction
图 1. 问题链与 AI 工具教学的三维协同框架

图 1 从目标层、过程层和评价层系统阐释了“问题链-AI”协同教学模式，该模型旨在超越技术手段与教学方法的简单叠加，构建相互增强、闭环反馈的教学系统。

- 1) 目标层协同：任务生成与结构化分解的精准映射。问题链教学将宏观工程挑战(如“高炉侵蚀模型”)解构为“宏观问题→思维跃迁→知识整合”的递进式任务序列，为 AI 工具提供明确的任务生成边界。AI 则通过评估学习者的能力参数(如对“一维导热”的掌握程度)，自适应调整题目难度与区分度，二者的协同实现了从工程问题到可量化、可执行学习任务的转化，确保了“问题”与“练习”的闭环衔接。
- 2) 过程层协同：认知负荷调控与知识结构显性化。问题链教学强调理论概念与工程实践关联(例如将“导热系数”与“炭砖类型”相结合)。AI 工具借助知识图谱实现理论知识的可视化，清晰呈现“理论 - 参数 - 应用”间的逻辑关联，通过信息结构化降低学生在处理复杂抽象内容时的认知负荷。
- 3) 评价层协同：数据驱动的即时干预与教学动态调优。问题链教学依赖于对学习过程中认知障碍的识别与诊断。AI 工具通过聚类分析生成“错误热力图”，为教师提供客观、及时的学情洞察。基于数据反馈，教师可调整问题链的难度梯度，如在进入“炉缸拐角热流优化”等高阶任务前插入针对性训练，形成“问题设计→AI 反馈→策略调优”的自增强教学闭环。

遵循上述协同逻辑，本研究以“高炉炉缸侵蚀”为宏观工程情境，依托阶梯式问题链、知识图谱与 AI 工具的有机整合，推动教学范式由“知识传授”向“能力生成”的系统转变。

2.2. 阶梯式问题链的工程锚定设计

以建立“高炉炉缸侵蚀”为目标，构建“基础 - 应用 - 思维跃迁”三级子问题序列。

1) 基础层(知识整合)。聚焦一维导热问题的数学建模,任务遵循“具体→抽象”的认知递进:① 给定多层平壁几何、物性参数及某层两界面温度,计算稳态热流密度与其他层界面温度(傅里叶定律直接应用);② 对多层圆筒壁进行相同计算;③ 对比平壁和圆筒壁的计算结果。对比常物性与变物性(如导热系数与温度相关 $\lambda(T)=\lambda_0(1+\alpha T)$)的计算结果,建立“理论简化-工程误差”的关联认知。

2) 应用层(能力转化)。延伸至多层耐火材料的传热过程,模拟实际工程场景,涉及碳砖侵蚀/凝固层形成等实际工况分析。

3) 创新层(思维跃迁)。设置开放性、跨学科综合问题,促进学生高阶工程思维:① 针对炉缸拐角非一维传热区域。② 开展二维稳态传热的数值解法分析。③ 侵蚀模型根据现场实际工况和应用场景及要求,一维导热、二维导热甚至三维导热的理论知识全部串联及应用。

2.3. 知识图谱的认知支撑体系

构建覆盖“动量-热量-质量”传输领域的结构化知识图谱,通过理论、案例与方法的多元关联,实现知识的系统化组织与可视化提取。图谱设计遵循以下原则:

1) 节点层级化组织。节点分为核心理论层(如傅里叶定律、导热微分方程)、物性参数层(如 λ , a)、工程应用层(如炉缸侵蚀模型)及方法工具层(如有限差分法),各层间建立逻辑连接。

2) 动态关联与信息呈现。支持交互式查询与关联展开。例如点击“炭砖导热系数”节点,可同步显示:① 理论影响因素;② 温度依赖实验曲线;③ 相关工程问题分析。

3) 个性化认知路径导航。依据学生能力参数自适应生成学习路径:基础较弱者沿“公式→例题→验证”顺序推进;能力强者则按“案例→反推理论→拓展应用”路径探究,实现差异化认知引导。

2.4. AI 工具的深度嵌入与闭环机制

将 AI 技术系统融入问题链全流程,主要体现为以下模块。

1) 动态任务生成模块。基于领域本体库(工程问题、理论概念、算法),结合学生学习状态,实时生成差异化训练题目。例如,检测到学生在“一维稳态导热”掌握率较弱,学生巩固该知识点后才能进入下一知识点。

2) 实时反馈与教学调优模块。构建“学生-AI-教师”三元反馈闭环:① 学生提交计算/代码后, AI 返回多维度评估报告;② 教师端接收 AI 生成的错误分析,动态调整教学内容。

在技术实现层面,本课程依托超星学习通云端平台实施,涉及知识图谱与课堂测评两个模块:教师端通过 Web 端构建图谱与题库、发布测验,学生端通过 App 自主学习与作答。需要说明的是,本轮应用中人工智能参与的具体环节限于基于知识图谱的自动组卷与随堂测评反馈:知识图谱由教师人工构建、平台辅助抽取后经人工校验;随堂测验题目来源为教师编写录入与平台生成后教师审核;最终评分、学情判断与教学决策均由教师完成。因此,本研究的技术应用更准确地定位于“知识图谱驱动的自适应测评”,而非由通用人工智能自主完成教学决策。

3. 教学实施流程与成效

3.1. 三阶段闭环教学实施框架

基于“问题链+AI”协同逻辑,构建“课前资源配置-课中探究实践-课后强化”的闭环教学流程,具体实施路径如下。

1) 课前资源预配置阶段。以“高炉炉缸侵蚀”为核心,完成三级问题链拆解,并通过 AI 系统植入知识图谱节点。资源包括(1) 测试题:针对傅里叶定律应用等核心知识点,生成含冶金特色参数(如炭砖导

热系数 $\lambda = 1.2、15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$)的差异化题目；(2) 工程案例库：整合高炉炉缸烧穿事故、炭砖侵蚀结构图等真实资料。

2) 课中探究。(1) 问题导入：通过仿真和文献研究呈现炉缸碳砖侵蚀工况，激活探究学习动机；(2) 协作建模：学生分组完成从物理模型到数学描述的转化。

3) 课后强化。(1) 完成“二维稳态导热”代码。(2) 查询炉缸侵蚀模型文献，引导从理论应用向前沿探究延伸。

3.2. 教学成效的数据化评估

为客观评价本模式的有效性，整理并分析了两学期(2024~2025-1 与 2025~2026-1)《冶金传输原理 2》课程的考核数据(样本量分别为 69 人与 74 人)。

在研究设计上需要说明的是，本研究未能设置同期平行的实验班与对照班，原因在于本课程试点班为行政排课自然形成，未作任何特殊安排，两届选课规则一致。为最大限度提升组间可比性，本研究采取了以下控制措施：(1) 两学期由同一教师授课，除引入问题链与 AI 环节外，教学大纲、授课内容、教学进度、考核方式与命题口径保持一致；(2) 两学期试卷依据同一双向细目表命题，阅卷采用统一评分量规；(3) 两学期均取全部选课学生成绩，未作样本删减。

图 2 可以看出，引入“问题链 + AI”协同教学模式后，2025~2026-1 学期学生的平均成绩由 68.2 分提升至 73.4 分，增幅约 7.6%，表明教学模式改革对学生学习成绩有正向促进作用。

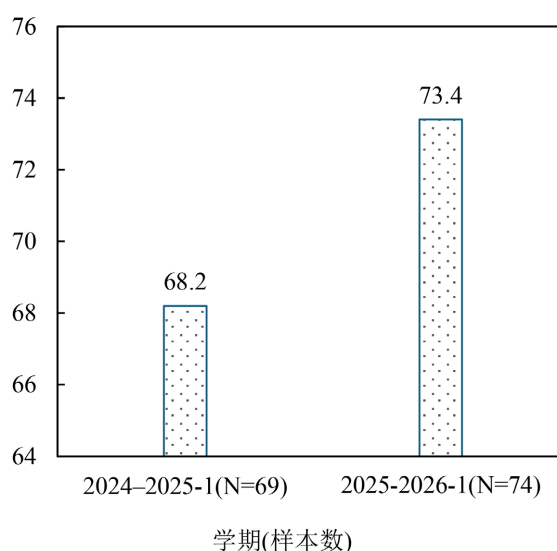


Figure 2. Average grade for the two semesters

图 2. 两学期的平均分

图 3 可以看出，① 高分段显著提升。优秀率从 4.35%提升至 9.46%，翻倍增长；80~89 分段占比提升最为显著(+12.54%)，说明更多学生进入良好及以上层次。② 中等分数段变化。70~79 分段小幅增长(+5.09%)，但 60~69 分段大幅下降(-23.11%)，表明原本处于及格线边缘的学生向更高分段迁移。③ 不及格率基本持平。不及格占比从 14.49%微增至 14.86%(+0.37%)，变化不明显。结合 60~69 分段下降 23.11 个百分点、80~89 分段上升 12.54 个百分点这一分布特征可以看出，本轮增益主要落在已具备基本理论基础、但缺乏工程迁移训练的中段学生身上，低分段学生未出现同步改善。可能的原因有两方面：其一，该群体的学习困难更多源于前序课程的累积性知识缺口，先修知识不足会限制其对即时反馈的加工与利

用；其二，本模式的定位为提升型干预而非补偿型干预，其作用以学习者已具备基本先修知识为前提。这一分布提示，若要改善极低分段学生的学业表现，需要在问题链之外另行设计补偿性的先修知识补救环节，而不能期望同一套干预同时覆盖两类群体。

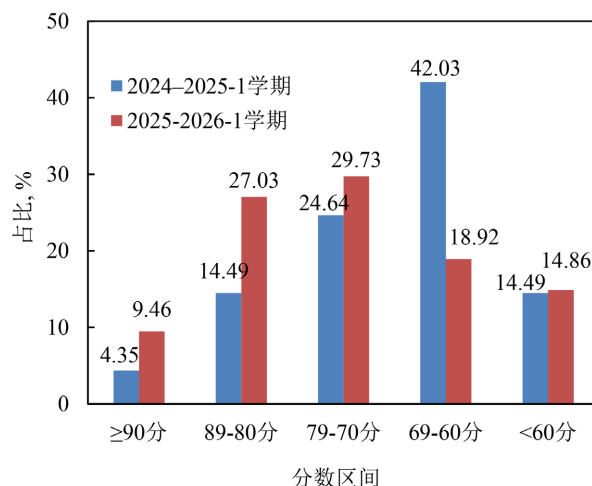


Figure 3. The proportion of people falling into different score ranges over two semesters

图 3. 两学期不同分数区间人数占比

3.3. 教学成效的机制分析与理论回应

“问题链 + AI”协同教学成效不仅体现在成绩提升上，更在于机制层面的优化：

1) 实现探究深度与反馈效率的统一。在保持问题链探究深度的同时，提供实时反馈与自适应学习支持，破解了传统问题导向教学模式“深度”与“效率”难以兼顾的困境。

2) 促进知识从离散到系统的建构。知识图谱的动态可视化与关联导航，帮助学生超越了零散的知识点记忆，形成了“理论 - 参数 - 应用”的连贯认知体系，提升系统思维能力。

3) 推动教学评价向数据驱动转型。依托 AI 生成的多维度学情报告(如成绩分布、错误热力图)，使教学调整从经验判断转向数据驱动，实现教学策略的动态优化与精准迭代。

从理论层面看，上述成效可与引言所依据的两个理论形成呼应。情境学习理论[14]强调学习应在真实实践情境中发生，本模式以高炉炉缸侵蚀这一真实工程问题贯穿三层级问题链，使理论学习始终锚定于工程情境，这与 60~89 分段学生工程情境类题目得分的改善方向一致。认知学徒制[13]强调通过脚手架支持使专家思维显性化并在适当时候淡出，本模式以知识图谱承载专家的知识组织结构、以 AI 辅助的自动组卷与即时反馈提供高频次指导，而将学情判断与教学决策保留给教师，正体现了脚手架“支持 - 淡出”的分工。同时，低分段学生未出现同步改善这一结果也为理论的适用边界提供了证据：当学习者的先修知识不足以支撑其进入情境任务时，情境与脚手架本身并不能自动弥补知识缺口。这一边界条件在以往 AI 赋能问题驱动式学习的研究中较少被报告。

4. 结论

本研究构建的“问题链 + AI”协同教学模式，以认知学徒制与情境学习理论为依据，通过真实工程问题链激发高阶思维，依托知识图谱建立系统认知框架，借助 AI 工具实现个性化训练与实时反馈，有效缓解了传统课堂中探究深度不足与反馈滞后的矛盾。教学实践数据表明，该模式使课程平均成绩提升

7.6%，优秀率翻倍增长，中等成绩段学生向更高层次显著迁移；同时不及格率基本持平，提示其作用性质为提升型干预而非补偿型干预。本研究的理论贡献在于将认知学徒制与情境学习理论在具有明确行业情境的专业课程中操作化，并报告了情境与脚手架发挥作用所需的先修知识前提。研究局限主要有三：结论应理解为改革前后的关联变化而非净效应；未开展针对 AI 工具的学生体验评估；能力评价主要依赖期末考试成绩，缺少课程项目与作品集等多元证据。后续研究将引入多元评估方式，并针对学困生设计补偿性干预。

参考文献

- [1] 刘妍, 李琳. AI 教育智能体支持的人机协同解决复杂工程问题实证研究——基于多回路问题链的探究[J]. 高等工程教育研究, 2025(5): 31-38.
- [2] 温才妃. 破解工程教育困局, 不只是打破“工科理科化”[N]. 中国科学报, 2023-08-29(004).
- [3] Li, J. and Zhao, H. (2026) Workflow-Embedded AI as a Cognitive Scaffold: A Randomized Trial on Knowledge Retention and Diagnostic Competency in Undergraduate Radiology Education. *European Journal of Radiology Open*, **16**, 100724. <https://doi.org/10.1016/j.ejro.2026.100724>
- [4] 管海宏. 传统的作业批改方式弊端种种[J]. 天津教育, 2002(2): 13-14.
- [5] 郝瀚. “问题驱动”的高校科学技术类通识课程建设——以“车用能源概论”课程为例[J]. 高等工程教育研究, 2025(4): 94-98.
- [6] 李培根. 工程教育需要从“知识导向”到“问题导向”的转型[J]. 高等工程教育研究, 2024(3): 1-8+200.
- [7] 高婷, 卫遥. 新工科背景下基于问题导向的“线性代数”课程教学模式研究[J]. 科技风, 2026(5): 13-15.
- [8] Liu, C., Wang, G.-C. and Wang, H.-F. (2025) The Application of Artificial Intelligence in Engineering Education: A Systematic Review. *IEEE Access*, **13**, 17895-17910. <https://doi.org/10.1109/access.2025.3532595>
- [9] Álvarez Ariza, J., Benitez Restrepo, M. and Hernández Hernández, C. (2025) Generative AI in Engineering and Computing Education: A Scoping Review of Empirical Studies and Educational Practices. *IEEE Access*, **13**, 30789-30810. <https://doi.org/10.1109/access.2025.3541424>
- [10] Kim, N.J., Belland, B.R. and Walker, A.E. (2017) Effectiveness of Computer-Based Scaffolding in the Context of Problem-Based Learning for Stem Education: Bayesian Meta-Analysis. *Educational Psychology Review*, **30**, 397-429. <https://doi.org/10.1007/s10648-017-9419-1>
- [11] Scholkmann, A., Schurer, M.H. and Hviid, C. (2025) Towards a Theory of Generative AI in Problem-Based Learning: Insights from a Design Experiment at Aalborg University. *Journal of Problem Based Learning in Higher Education*, **13**, 130-152. <https://doi.org/10.54337/ojs.jpblhe.v13i1.10033>
- [12] Newstetter, W.C. (2005) Designing Cognitive Apprenticeships for Biomedical Engineering. *Journal of Engineering Education*, **94**, 207-213. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2005.tb00841.x>
- [13] Collins, A., Brown, J.S. and Holum, A. (1991) Cognitive Apprenticeship: Making Thinking Visible. *American Educator*, **15**, 6-11, 38-46.
- [14] Lave, J. and Wenger, E. (1991) *Situated Learning: Legitimate Peripheral Participation*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511815355>