

从线圈到系统：WPT项目驱动与AI赋能的电路分析课程改革

刘 甜, 王 忠, 岳 园, 田 琦, 王杰玲

火箭军工程大学电子技术系, 陕西 西安

收稿日期: 2026年9月15日; 录用日期: 2026年10月12日; 发布日期: 2026年10月21日

摘 要

针对电路分析基础课程教学中存在的知识点孤立、工程主线缺失、个性化指导不足等问题, 本文提出以无线功率传输(WPT)系统为主线重构课程内容, 打破传统章节线性次序, 围绕“线圈建模-谐振分析-功率传输-等效变换-暂态保护”五个功能模块, 设计五项递进式仿真任务, 覆盖电路模型、等效变换、正弦稳态、谐振、互感、一阶暂态等核心知识点, 并引入AI辅助教学。在测控工程专业78人的试点班中, 期末卷面平均分提高6.7分, 综合设计优秀率提升19%, 学生对“电路理论理解更深入”的认同率从68%升至92%。实践表明, 该模式显著提升了学生对知识体系的整体把握和工程实践能力。

关键词

电路教学, 无线功率传输, 项目驱动, 人工智能, 教学改革

From Coils to Systems: Project-Driven and AI-Enabled Circuit Analysis Course Reform for WPT

Tian Liu, Zhong Wang, Yuan Yue, Qi Tian, Jiuling Wang

Department of Electronic Technology, Rocket Force University of Engineering, Xi'an Shaanxi

Received: September 15, 2026; accepted: October 12, 2026; published: October 21, 2026

Abstract

Aiming at the problems in the teaching of Fundamentals of Circuit Analysis, such as isolated knowledge points, lack of engineering mainline and insufficient personalized guidance, this paper proposes

文章引用: 刘甜, 王忠, 岳园, 田琦, 王杰玲. 从线圈到系统: WPT 项目驱动与 AI 赋能的电路分析课程改革[J]. 创新教育研究, 2026, 14(10): 404-411. DOI: 10.12677/ces.2026.1410804

reconstructing the curriculum content with the wireless power transfer (WPT) system as the main thread. Breaking the linear order of traditional chapters, five progressive simulation tasks are designed around five functional modules: coil modeling, resonance analysis, power transfer, equivalent transformation and transient protection. These tasks cover core knowledge points including circuit models, equivalent transformation, sinusoidal steady state, resonance, mutual inductance and first-order transients, with AI-assisted teaching introduced. In a pilot class of 78 students majoring in measurement and control engineering, the average score of the final written examination increased by 6.7 points, the excellent rate of comprehensive design rose by 19%, and students' recognition rate of "deeper understanding of circuit theory" increased from 68% to 92%. Practice shows that this mode significantly improves students' overall mastery of the knowledge system and engineering practice ability.

Keywords

Circuit Teaching, Wireless Power Transfer, Project-Driven, Artificial Intelligence, Teaching Reform

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

电路分析基础是电类专业的首门专业基础课程,其教学质量直接影响学生对后续专业课程的学习[1]-[3]。然而,传统教学普遍存在以下突出问题[4]:第一,知识点按“电阻电路→动态电路→正弦稳态→谐振”线性组织,各章节之间缺少贯穿始终的工程主线,学生学完仍难理解知识间的内在联系。第二,实验多为验证性实验(如验证基尔霍夫定律、叠加定理),缺乏设计与综合性训练,学生难以形成系统思维。另外,在大班教学中,教师难兼顾每位学生的进度与疑难,学生遇到细节问题卡顿时间长,影响学习效率。而且,尽管课程考核包含了电磁炮设计的综合实践项目,但该项目与电路分析核心知识点(互感、谐振、最大功率传输等)关联较弱,学生完成项目后仍无法有效整合运用课程知识,实践育人效果打折扣。

项目式学习(Project-Based Learning, PBL)是以真实工程问题为驱动、以任务探究为核心的建构式教学模式,强调让学生在完整的项目情境中完成知识建构、能力训练与思维拓展,是工科基础课程落实能力培养的典型教学模式。近年来,大量研究尝试依托工程载体开展 PBL 教学,利用信息化手段优化课堂指导,比如张鹏图等人[5]将项目式教学法融入开放创新实验课程,卫沅等人[6]基于知识图谱构建项目时教学,丁卉等人[7]在深度学习课程中探索了教师-AI 课堂-学生三者协同的新型项目式教学模式。但现有相关研究多聚焦于单一项目改造或单纯的信息化工具应用,较少结合 PBL 教学逻辑,构建“工程载体+递进任务+智能赋能”的一体化教学体系,尤其是在电路类课程中,还普遍存在项目与课程核心知识点贴合度不足、个性化教学支撑不足等问题。

无线功率传输(WPT)技术[8]是一种通过磁场耦合实现电能非接触传输的技术,其基本原理涉及互感、谐振、最大功率传输、暂态响应等电路分析基础的核心内容,非常适合作为项目式教学的主线。同时,人工智能(AI)技术的发展也为个性化教学提供了新工具[9]。本文以 WPT 系统为载体,重构电路分析基础课程的教学内容,设计递进式任务体系,并引入 AI 辅助教学,探索“项目驱动、AI 赋能”的教学改革路径。总体框架如图 1 所示。

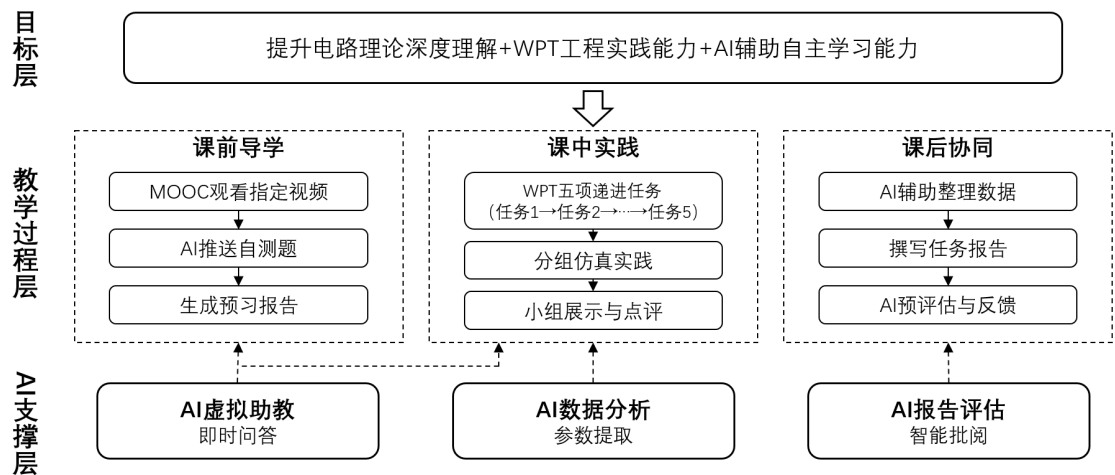


Figure 1. Overall framework of “WPT Project + AI-Assisted” teaching mode
图 1. “WPT 项目 + AI 辅助” 教学模式总体框架图

2. 教学内容重构设计

2.1. 知识模块与 WPT 系统的映射

电路分析基础课程的传统知识模块包括：电路模型与基尔霍夫定律、等效变换与电路定理、正弦稳态分析(相量法、阻抗、功率、谐振)、互感与理想变压器、一阶/二阶暂态分析。一个典型的磁耦合谐振式 WPT 系统[10] (基本结构：发射线圈 - 接收线圈 - 负载)能够将这五大知识模块自然地串联起来，具体映射关系见表 1。

Table 1. Mapping between traditional knowledge modules and WPT systems
表 1. 传统知识模块与 WPT 系统的映射关系

知识模块	WPT 关联内容	具体知识点
电路模型与基本定律	线圈建模、回路电流	电压源、电阻、电感、互感、欧姆定律、基尔霍夫定律
等效变换与电路定理	反射阻抗、最大功率传输	戴维南等效、最大功率传输定理
正弦稳态分析	谐振、相量法	阻抗、导纳、串联/并联谐振、品质因数、功率
互感与耦合电路	线圈间磁耦合	互感电压、同名端、耦合系数
一阶暂态分析	负载突变时的过电压	RC/RL 电路零输入响应、时间常数

由表可见，WPT 系统为各知识点提供了一个统一且具体的工程载体：从线圈的电路建模到谐振频率的计算与验证，从反射阻抗的等效变换到功率因数与传输效率的关系，再到负载突变时的暂态过电压抑制，每个环节都对应一个或多个核心知识点。学生完成递进式任务的过程中，能够自然地实现知识点的跨章节整合，最终建立起“从线圈到系统”的整体工程认知框架。

2.2. 五项递进式任务设计

以“设计并分析一个磁耦合谐振式 WPT 系统”为项目目标，设计五项递进式任务。任务遵循“从元件到系统、从稳态到暂态、从理论到应用”的认知规律，全部采用 Multisim [11] 仿真平台完成(任务 1 可扩展为硬件实验)，便于大班教学实施。五项任务依次为：互感参数测量、串联谐振与最大功率传输、反射阻抗与戴维南等效、谐振与非谐振功率对比、暂态过电压抑制。各任务的核心知识点与成果要求如下。

任务 1: 互感参数测量与耦合系数分析

在 Multisim 仿真环境中构建两个电感线圈, 电感值 $L_1 = L_2 = 100 \mu\text{H}$, 通过添加“互感”元件并设置耦合系数 k (0~1) 来模拟线圈间的磁耦合。依次改变 k 值, 分别测量初级电流与次级开路电压, 据此验证互感 $M = k\sqrt{L_1 L_2}$ 的关系。随后, 交换其中一个线圈的两个接线端(即改变同名端的相对连接方式), 观察次级感应电压极性的变化情况, 从中归纳总结同名端的判别规则。

输出: 绘制 M - k 关系曲线; 总结同名端对电压相位的影响规律。

任务 2: 串联谐振与最大功率传输

搭建一个由发射侧和接收侧组成的 WPT 系统。其中发射侧由正弦电压源 V_s 、串联电容 C_1 (10nF) 和线圈 L_1 构成; 接收侧, 由线圈 L_2 、串联电容 C_2 (10nF) 和负载电阻 $R_L = 10\Omega$ 构成。根据公式 $f_0 = 1/\sqrt{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}$ 计算理论谐振频率, 通过交流扫频分析观察负载电压幅频特性, 验证实际谐振点。固定谐振频率, 改变耦合系数 k (即改变互感 M), 测量负载有功功率 P_{out} , 绘制 P_{out} - k 曲线, 找出最大功率点对应的最佳耦合系数 k_{opt} 。推导最大功率条件 $M_{\text{opt}} = \sqrt{r_1 R_L} / \omega_0$ (r_1 为初级回路电阻), 并与实验测量值进行对比。

输出: 谐振频率实测值与理论值对比表; 功率-耦合系数曲线, 标出最大功率点; 反射阻抗计算过程。

任务 3: 反射阻抗与戴维南等效

在任务 2 的基础上, 计算接收回路对发射回路的反射阻抗 $Z_{\text{ref}} = (\omega M)^2 / (R_L + j\omega L_2 + 1/(j\omega C_2))$, 验证在谐振频率下 Z_{ref} 为纯电阻。将接收侧对发射侧的影响等效为一个电阻 $R_{\text{eq}} = Z_{\text{ref}}$, 用戴维南等效电路替代整个接收侧, 对比等效前后发射回路电流波形(有效值和相位), 验证等效的准确性。

输出: 反射阻抗计算表达式; 戴维南等效电路; 等效前后发射回路电流波形截图, 并附上误差分析。

任务 4: 谐振与非谐振状态下的功率传输对比

保持系统工作频率不变(固定为任务 2 测得的谐振频率), 改变接收侧电容 C_2 (取 0.5 倍、0.8 倍、1 倍、1.2 倍、1.5 倍标称值), 使接收回路偏离谐振。在每种电容值下, 测量负载有功功率 P_{out} 以及发射回路电压、电流之间的相位差 φ , 计算功率因数 $\cos\varphi$ 。绘制 P_{out} 与 $\cos\varphi$ 随 C_2 变化的曲线, 分析功率因数对功率传输效率的影响。解释为何谐振 $\cos\varphi = 1$ (发射回路) 但负载功率不一定最大(反射阻抗变化导致初级回路总电阻改变)。

输出: 功率因数-电容关系曲线; 负载功率-电容关系曲线; 分析报告说明非谐振状态下无功功率的流向。

任务 5: 负载突变时的暂态过电压分析与抑制

在接收侧负载 R_L 两端并联时控开关(或电压控制开关), 模拟负载突然断开。进行瞬态分析, 捕捉负载断开瞬间线圈 L_2 两端的电压尖峰, 并解释其成因(电感电流不能突变, $u_L = L \cdot di/dt$ 产生高压)。在线圈 L_2 两端并联 RC 吸收电路($R_s = 10 \Omega$ 、 $C_s = 10 \text{ nF}$), 重新进行瞬态分析, 对比加入吸收电路前后的尖峰幅值, 计算尖峰抑制率。尝试改变 RC 参数, 观察抑制效果变化, 并联系一阶 RC 电路的零输入响应时间常数。

输出: 给出未加保护时的过电压尖峰波形、加入 RC 吸收后的波形、尖峰抑制率的计算表格, 并阐述 RC 吸收电路的工作原理及参数影响。

上述五项任务在设计上存在递进关系: 任务 1 解决互感参数的基础测量问题, 任务 2 引入谐振与最大功率传输条件, 任务 3 借助反射阻抗概念强化等效变换思想, 任务 4 将功率因数从理想谐振拓展至失谐工况, 任务 5 则延伸至暂态过程中的工程保护问题。学生依次完成全部任务后, 应能系统掌握电路分析基础的核心知识, 并初步具备分析、设计简单 WPT 系统的能力。所有任务均可在 Multisim 平台上完成, 其中任务 1 还可扩展为配合 LCR 表与实际线圈的硬件实验, 以进一步提升实践能力。

3. AI 辅助教学融入设计

为支撑“WPT 项目驱动”的教学改革并缓解大班教学中的个性化指导不足，本研究搭建了一套适配电路项目式学习的轻量化 AI 辅助教学系统架构。该架构为分层模块化设计，整体包含数据输入、智能处理、教学应用、结果输出四个核心层级，各层级协同完成智能化教学辅助工作。其中，数据输入层接收学生提问、仿真数据、课程报告等学习资料；智能处理层依托大模型语义理解与数据解析能力，完成问题识别、数据运算与文本筛查；教学应用层对应搭建 AI 虚拟助教、AI 辅助数据分析、AI 辅助报告评估三类功能模块，全覆盖项目学习的答疑、数据处理、成果评价场景；最终通过结果输出层向学生提供个性化学习反馈，同时为教师汇总学情数据，构成完整的智能教学支撑体系。

针对学生在完成五项递进任务时可能遇到的典型困难，本文依托上述架构引入三类 AI 辅助工具：AI 虚拟助教(即时问答) [12]、AI 辅助数据分析(代码生成) [13]以及 AI 辅助报告评估(智能批阅)。三者贯穿任务全过程，共同构建“AI 赋能 WPT 项目”的智能化学习环境。具体 AI 辅助功能情况见表 2。

AI 虚拟助教：学生可随时提问，例如“同名端如何判断”或“谐振频率偏差原因”，AI 仅提供思路而不给完整答案。教师每周汇总高频问题，在课堂上集中讲解。

AI 数据分析：学生将 Multisim 导出的 CSV 上传后，输入对应功能指令，AI 能够返回表格、曲线及关键数值，不需要学生自己编程。

AI 报告评估：AI 会自动检查学生提交的报告是否包含了原理说明、仿真过程、数据分析等内容，并对核心部分(如任务 2 的谐振对比表、任务 5 的尖峰抑制率)给出评估意见，生成个性化的修改建议，教师复核后确定最终成绩。采取这种方式之后，每份报告的批阅时间由原来的 20 分钟缩短到了 8 到 10 分钟。

这三类 AI 辅助工具分别解决不同阶段的问题，即遇到卡点时有人帮、处理数据时有自动化、提交报告后有反馈，形成了一条完整的支持链条，从而提升学生的自主学习能力和工程实践能力。

Table 2. AI assisted function integration table

表 2. AI 辅助功能融合表

AI 辅助类型	作用时机	实现方式	在 WPT 任务中的具体应用	覆盖任务
AI 虚拟助教	任务进行中 (即时)	基于 DeepSeek API 接入课程微信群， 7 × 24 小时自动回复	解答概念疑问、指导仿真操作、排查 仿真故障	1~5
AI 数据分析	数据处理环节	上传 CSV 文件，AI 自动完成数据分析	提取谐振频率、最佳耦合系数、尖峰 抑制率等参数	1, 2, 4, 5
AI 报告评估	任务提交后	AI 预先检测报告的完整性，并生成 修改建议	检测核心内容是否齐全(如谐振对比表、 Q 值分析)	1~5

4. 教学实施与评价

4.1. 教学实施

采用“课前导学，课中实践，课后 AI 协同”的混合式教学，各环节的做法如下：

课前(导学)：学生先通过中国大学 MOOC 平台观看指定视频，内容主要包括谐振、互感、最大功率传输等在 WPT 任务中会用到的知识点。AI 虚拟助教自动推送 3 至 5 道自测题，比如“串联谐振时电路阻抗呈什么性质？为什么？”系统会根据学生答题情况，为每个学生出具一份预习报告，并标注出自身薄弱环节。教师可以查看全班同学预习数据，然后调整课堂上的精讲内容。

课中(实践)：学生每两次课完成一个 WPT 任务，一节课大致分为三个环节：先用 20 分钟，教师精讲本次任务所需要的核心理论，并结合 WPT 工程案例展开说明；接下来留一小时，学生两人一组进行

Multisim 仿真，这一过程中教师巡回指导，AI 虚拟助教也在线解答具体的操作细节，比如“如何设置耦合系数 k 的步长”等。最后 10 分钟，各小组展示自己的阶段性成果，教师点评共性问题。

课后(协同): 学生借助 AI 工具整理仿真数据、绘制曲线、并撰写任务报告。在报告提交前，学生可以通过 AI 预评估系统检查格式是否完整(是否包含原理推导、仿真截图、数据表格、分析讨论)以及内容是否规范(图表标注、单位、术语对不对)，根据 AI 的反馈结果修改后再重新提交正式版本。教师先利用 AI 评分助手进行批量的预评估，随后再人工复核，快速返回成绩，并给出个性化评语。

这个模式利用了 AI 的即时性与个性化特点，把教师从大量的重复答疑中解脱出来，有更多的精力进行高阶思维引导。

4.2. 考核体系

考核体系见表 3。其中闭卷考试占 50%，保证学生对基础理论的扎实掌握；任务报告与综合设计一共占比 40%，用来突出实践能力与过程评价；答辩和平时表现占比 10%，鼓励学生主动参与、深度思考。这个考核体系注重理论考核的同时，也关注工程实践能力的培养。

Table 3. Assessment system
表 3. 考核体系

考核项	权重	说明
闭卷考试	50%	覆盖电路分析核心知识点，题目结合 WPT 工程背景
五项任务报告	30%	按原理(20%)、仿真(40%)、结果分析(30%)、规范性(10%)进行评分，AI 预评估辅助
期末综合设计	10%	优化 WPT 系统(如改变线圈形状或增加磁芯)，报告需包含 AI 辅助环节及对话记录
答辩汇报	5%	8 分钟 PPT 展示改进方案与 AI 使用情况，教师随机提问
平时表现(含 AI 互动)	5%	签到、课堂参与情况、向 AI 助教提问的质量与次数

4.3. 实践效果

在 2025~2026 学年第一学期，我们选取测控工程专业的 78 人作为试点，按照上述教学模式进行实施。另外选了一个平行班(82 人)采用传统的教学模式(章节讲授 + 期末闭卷考试 + 电磁炮综合实践)作为对照。两个班级学生的入学成绩、前序课程成绩没有明显差异。

4.3.1. 量化对比结果

量化对比结果见表 4。

Table 4. Quantitative comparison
表 4. 量化对比

指标	试点班(n = 78)	传统班(n = 82)	提升幅度
期末卷面平均分(满分 100)	82.3	75.6	+6.7 分
综合设计优秀率(≥ 90 分)	38.5%	19.5%	+19%
课程设计优良率(≥ 75 分)	86.2%	61.0%	+25.2%
问卷调查“对电路理论理解更深入”同意率	92%	68%	+24%
问卷调查“愿意主动探究工程问题”同意率	88%	52%	+36%

4.3.2. 教学过程数据

正教师平均每周答疑时间从实施前的 4.5 小时降至 2 小时，AI 承担了约 60%的常规问题解答。学生

问题解决等待时间从平均 6 小时(依赖教师课后答疑)缩短至 0.5 小时以内, AI 即时回复显著提升了学习效率。学生向 AI 虚拟助教提问的平均频次为每周 2.8 次/人, 其中约 35%的问题涉及概念辨析(如“反射阻抗与直接串入电阻有何区别”), 45%涉及仿真操作(如“参数扫描曲线抖动怎么办”), 20%涉及数据分析(如“如何从波形读取衰减时间常数”)。

4.3.3. 典型学生反馈

学生普遍给予积极反馈, 典型原话包括: “以前觉得谐振、互感都是独立的公式, 现在知道它们一起工作才能传电, WPT 系统让我把知识串起来了。” “AI 帮我自动找出了功率最大点对应的 k 值, 不用自己瞎猜, 还能看到代码是怎么写的, 学到了新技能。” “任务 5 的过电压尖峰让我真正理解了电感为什么‘讨厌’电流变化, 做仿真比背十遍公式都有用。” “AI 助教半夜也能回答问题, 卡住了不用等到第二天, 效率高了很多。”

4.3.4. 教师反思

试点中发现个别学生过度依赖 AI, 遇到问题不经思考直接向 AI 索要答案。针对这一现象, 教师后期在课堂中强调“提问前必须先尝试自己解决”, 并在 AI 助教提示词中增加了“先提供思路提示, 不直接给完整解决方案”的约束。在评分标准中, 也增加了“AI 使用日志”的要求, 学生需记录向 AI 提问的内容及自己后续的处理过程, 以促进深度思考。

从本次试点情况来看, 采用 WPT 项目驱动与 AI 辅助相结合的教学模式之后, 学生在理论理解、工程实践以及学习主动性等方面都有了明显提升。这个做法对后续电路分析基础课程的改革提供了一定的参考价值。

5. 结束语

本文用无线功率传输系统作为课程主线, 重构了电路分析基础课程的教学内容, 设计了五项递进式仿真任务, 涉及电路模型、等效变换、网络定理、正弦稳态、谐振、互感、一阶暂态等知识点。依托项目式学习的指导, 研究引入了 AI 辅助教学, 提供虚拟助教、数据分析、报告评估这三项智能化支持。实际教学中发现, 这个模式对于知识点分散、工程主线不清晰、个性化指导不足等常见问题, 起到了一定的缓解作用, 而且学生的理论掌握情况和工程实践能力都明显提高了。

下一步, 我们打算进一步开发定制化的 AI 教学智能体, 给学生推荐更个性化的学习路径, 并建立学习行为检测评估机制; 在项目任务设计上, 尝试设置更加开放、具有挑战性的工程问题, 增设硬件实践环节, 优化团队协作与成果答辩环节。同时也会把这个模式推广至模拟电子技术、信号与系统等类似的课程, 并尝试基于知识图谱的 AI 课程助教系统。

基金项目

校级教学课题, “生成式 AI 驱动电路课程教学模式的研究与探索”(HJJKT-C2025010)。

参考文献

- [1] 邱关源. 电路[M]. 第 6 版. 北京: 高等教育出版社, 2022.
- [2] 李瀚荪. 电路分析基础[M]. 第 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2017.
- [3] 教育部高等学校电工电子基础课程教学指导分委员会. 高等学校电子电气基础课程教学基本要求[M]. 北京: 高等教育出版社, 2024.
- [4] 赫玉莹, 张犁, 胡景新. 数字赋能与项目驱动的“电力电子技术”课程教学探索[J]. 教育教学论坛, 2026(6): 117-120.

-
- [5] 张鹏图, 王丛丛, 张春晓, 等. 突出应用特色的化学类开放创新实验课程项目式教学创新模式[J]. 化学教育(中英文), 2024, 45(18): 44-49.
 - [6] 卫沅, 周志刚, 董振乐. 基于知识图谱的新型项目式教学的探索与实践[J]. 实验室研究与探索, 2026, 45(1): 181-185.
 - [7] 丁卉, 宋杰, 刘烨, 等. 基于“教师-AI 课堂-学生”协同的人工智能课程项目式教学模式探索[J]. 高等工程教育研究, 2026(3): 54-58+118.
 - [8] 徐琛, 尹仕, 石丹. 面向教学的磁耦合谐振式无线电能传输系统研究[J]. 机电工程技术, 2024, 53(9): 286-290.
 - [9] 贾积有, 刘怀亚. 人工智能与教育的深度融合: 内涵、应用与建议[J]. 数字教育, 2025, 11(3): 1-6.
 - [10] 刘耀, 肖晋宇, 赵小令, 等. 无线电能传输技术发展与应用综述[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(2): 48-67.
 - [11] 李芳, 付琳, 谭玲玲, 等. 自主设计型电路分析线上仿真实验教学改革与实践[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(7): 237-241+256.
 - [12] 柴玉梅. 知识图谱与 AI 助教赋能的离散数学教学改革: 模式设计与实践成效[J]. 电脑知识与技术, 2026, 22(8): 124-126+134.
 - [13] 吴正洋, 梁梓杰, 王腾, 等. 融合知识检索增强 AI 助教的编程实验教学模式应用[J]. 计算机教育, 2026(2): 109-115.