基于知识图谱与虚拟仿真的“工程电磁场”教学改革与实践

姜永将*，姚金明，杨 艳，张文峰

南京邮电大学自动化学院 江苏南京

【摘要】“工程电磁场”是电气工程类专业的核心基础课程，其理论体系的抽象性、数学描述的复杂性以及空间概念要求的严苛性，使得传统教学模式面临学生“认知难、理解浅、应用弱”的普遍困境。为破解这一教学难题，本文构建并实践了一套深度融合课程知识图谱与专业虚拟仿真的系统化教学改革方案。方案首先借鉴结构化课程建设理念，绘制了以电磁场基本规律为主干、以工程应用为枝叶的课程知识图谱，实现了教学内容的结构化、可视化和逻辑化重组。继而，依托自主开发的“直线电机数值仿真实验平台”，将抽象的场分布、参数耦合与动态过程，转化为可交互操作、可实时观测、可深度探究的虚拟仿真实验。由此形成的“理论图谱导航、虚拟仿真验证、问题项目驱动”混合式教学模式，有效打通了从抽象理论到工程实践的认知路径，显著提升了学生的空间想象能力、系统分析能力和创新实践能力。实践表明，该改革不仅增强了课程的教学成效，也为后续“电机学”等专业课程提供了坚实的“场”思维与“仿真”技能基础。

【关键词】工程电磁场；知识图谱；虚拟仿真；教学改革；直线电机

【基金项目】南京邮电大学教学改革研究项目（JG00524JX69）

【收稿日期】2026 年 8 月 15 日 【出刊日期】2026 年 9 月 20 日 【DOI】10.12208/j.jeea.20260020

Teaching reform exploration of “Engineering Electromagnetics” based on knowledge graph and virtual simulation

Yongjiang Jiang, Jinming Yao, Yan Yang, Wenfeng Zhang*

College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu

【**Abstract**】“Engineering Electromagnetics” is a core foundational course for electrical engineering majors. The abstract nature of its theoretical system, the complexity of its mathematical descriptions, and the demanding requirement for spatial conceptualization have led to widespread student difficulties characterized by “challenging cognition, superficial understanding, and weak application” under traditional teaching models. To address this pedagogical challenge, this paper constructs and implements a systematic teaching reform scheme that deeply integrates course knowledge graphs with professional virtual simulation. The scheme first draws upon structured course design concepts to map a course knowledge graph with the fundamental laws of electromagnetic fields as its trunk and engineering applications as its branches, achieving a structured, visualized, and logically reorganized presentation of the teaching content. Subsequently, relying on the self-developed “Linear Motor Numerical Simulation Experiment Platform”, it transforms abstract field distributions, parameter couplings, and dynamic processes into interactive, real-time observable, and deeply explorable virtual simulation experiments. The resulting blended teaching model of “theoretical graph navigation, virtual simulation verification, and problem/project-driven learning” effectively bridges the cognitive path from abstract theory to engineering practice, significantly enhancing students’ spatial imagination, systematic analysis, and innovative practical abilities. Practice demonstrates that this reform not only improves teaching effectiveness but also provides a solid foundation in “field” thinking and “simulation” skills for subsequent specialized courses such as “Electric Machinery”.

【**Keywords**】Engineering electromagnetics; Knowledge graph; Virtual simulation; Teaching reform; Linear motor

*通讯作者：姜永将

1 引言

“工程电磁场”课程是电气工程知识体系的重要基石，其内容涵盖静电场、恒定电场、恒定磁场及时变电磁场，构成了从物理原理到电气设备（如电机、变压器、断路器）设计的核心理论桥梁[1]。在工程教育认证背景下，该课程的建设与改革尤为重要[2]。然而，该课程历来被学生视为“天书”，其根本原因在于“场”概念的抽象无形、矢量分析与偏微分方程求解的数学艰深，以及理论与实际电磁装置内部复杂物理过程联系的薄弱。传统的“教材章节顺序讲解+公式推导+有限验证实验”教学模式，难以帮助学生构建完整的空间电磁图像和解决实际工程问题的思维框架[3]。

面对新时代工程教育对创新能力与实践能力培养的迫切需求，课程改革势在必行。近年来，教育界提出了多种创新教学方法：基于问题的学习（PBL）[4,5]、概念恢复教学（CPR）[6]、主线式教学法[7]等，这些方法都强调学生的主动参与和深度学习。在信息化教学方面，知识图谱技术作为一种强大的知识管理和智能应用技术，已成为高等教育数字化转型的重要抓手[8]。知识图谱通过将知识以语义网络的形式进行组织和结构化，可以实现知识点的充分细化和有效重组，从而改善教学效果[9]。然而，现有研究多停留在理论探讨层面，缺乏将结构化知识表示与交互式虚拟仿真相结合的系统化实践。改革的核心在于破解“抽象”与“实践”之间的矛盾。本文提出的改革路径是双轨融合：一轨是知识的结构化与可视化，即通过构建课程知识图谱，将离散、线性的知识点编织成一张体现内在逻辑关系的认知网络，使学生“既见树木，又见森林”；另一轨是实践的可视化与交互化，即利用先进的数值仿真技术，开发高度集成、面向教学的虚拟实验平台，让学生在虚拟环境中“触摸”磁场、“操纵”参数、“观察”效应，实现理论与现象的直接对话。

本研究以教育学中的“主线式教学法”[7]和信息化教学的“知识图谱”理念[8,9]为基石，开发可视化电机仿真平台作为核心教具[10-12]，将抽象电磁场直观呈现。在此基础上，系统地设计并实施了“工程电磁场”课程的教学改革，力求为同类理论性强的工科基础课提供可复制、可推广的范式。

2 课程教学核心问题深度剖析

传统教学模式的困境并非单一因素造成，而是源于知识呈现方式、实践手段与学生认知规律的多重脱节。

知识的碎片化与认知图景缺失：按教材章节平铺直叙，静电场、恒定磁场、时变场被分割为孤立模块。学生虽能学习单个知识点（如高斯定理、安培环路定律），却难以自主构建这些定律之间的关联，以及它们如何共同支撑起一个完整电磁设备（如一台电机）的工作原理认知图景[1]。

数学形式掩盖物理本质：课程中大量的散度、旋度、拉普拉斯方程等数学工具，本应是描述物理规律的语言，但在教学过程中往往反客为主，成为学生的主要记忆和应试负担。结果，学生无暇思考背后的物理图像（如“旋度为零”意味着场无涡旋、“散度不为零”意味着存在源），更谈不上领悟其工程意义[13]。

实验教学的局限与脱节：传统电磁场实验多以测量某点磁场强度、验证某些定理为主，实验装置固定、现象单一。这类实验无法展示场在空间中的连续分布，无法灵活改变几何结构或材料属性以观察其影响，更无法模拟如直线电机运动这类动态、复杂的电磁过程，与课程理论核心和现代电气工程的设计与分析范式严重脱节[14]。

学习动力与目标模糊：由于缺乏与前沿工程应用（如高速磁浮列车、电磁弹射、无线充电）的直观联系，学生常感学习目标模糊，不知所学何用，从而丧失主动探究的内驱力[15]。

3 知识图谱与虚拟仿真协同教学框架

为解决上述系统性难题，本文提出知识图谱与虚拟仿真协同的教学改革框架。该框架以“学生能力发展”为核心，依托知识图谱实现理论知识的结构化组织与导航，借助虚拟仿真平台支持实践过程的可视化探究，构建起“结构化知识”与“可视化实践”两大教学支柱。通过“问题驱动”与“项目导向”的方式进行有机整合，形成“理论—实践—创新”闭环的教学模式，协同推动学生综合能力的持续提升。

3.1 知识图谱构建：从线性章节到立体网络

本文依据智慧树课程图谱建设方法，将工程电磁场课程重构为一个多层级、强关联的综合型知识图谱，如图 1 所示。

（1）顶层框架设计

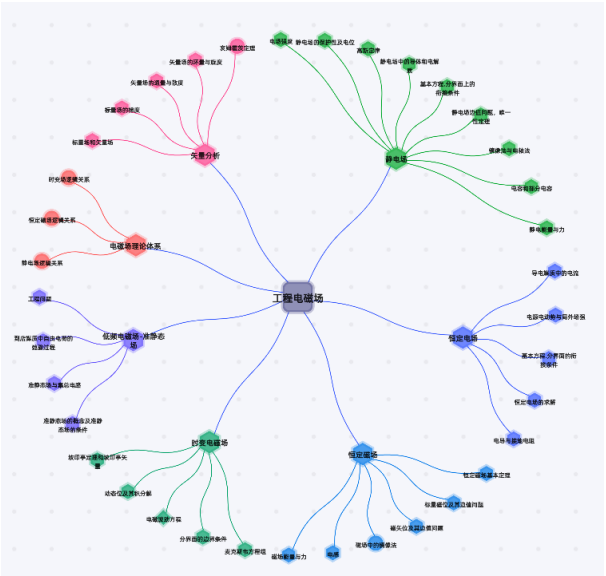
确立“场论数学基础”、“静电场”、“恒定电场”、“恒定磁场”、“时变电磁场”以及“准静态场”六大核心模块。这打破了原教材的物理划分，突出了数学工具的基础地位和工程应用的导向作用，将工程应用的思维作为一条红线，贯穿于从课程定位、图谱关联、课堂教学到考核评价的全过程。

（2）细粒度知识节点与关系定义

节点：不仅包含“库仑定律”、“麦克斯韦方程组”等核心概念，也包含“分离变量法”、“镜像法”等解题方法，以及“电容”、“电感”、“电磁力”等工程参数。



（a）整体框架



（b）知识体系图谱

图 1　基于知识图谱的智慧课程建设

关系：

1）继承与推广：如“库仑定律”是“高斯定理”在点电荷特例下的体现；“法拉第电磁感应定律”是“麦克斯韦方程组”中感应电场方程的积分形式。

2）对比与对偶：建立“静电场（标量位、无旋）”与“恒定磁场（矢量位、无散）”的对比关系；建立“传导电流”与“位移电流”的对比关系，深化对场本质的理解。

3）组成与支撑：明确“边值问题”由“控制方程”、“边界条件”、“域内媒质”组成；“电机转矩”的计算依赖于对“磁场分布”和“洛伦兹力定律”的理解。

（3）图谱的可视化与动态化：利用专业软件构建可交互的网页版知识图谱。学生可以点击任一节点，查看其详细释义、相关公式、历史背景；可以展开或折叠分支，根据需要调整知识视野的广度和深度；系统还能根据学习路径，高亮显示已学、正在学和未学内容。

3.2 虚拟仿真平台：从抽象公式到直观现象

基于 MATLAB 与 COMSOL Multiphysics 开发的“直线电机数值仿真实验平台”，是本改革方案的核心实践载体。其教学价值在于：

提供真实的工程对象语境：如图 2 所示，平台内置五种典型直线电机（圆筒型同步/感应、扁平型同步/感应、电励磁超导），点击任意一种电机右侧的稳态或暂态按钮，即可进入该种电机的稳态或暂态仿真 GUI 界面。此时，学生看到的不再是抽象的“场域”或“线圈”，而是具有明确工程背景的实体。这瞬间将课程理论与高速精密驱动、磁悬浮交通等前沿领域联系起来。



图 2　平台界面

实现参数化的交互探究：学生无需编程或精通有限元软件。如图 3 所示，采用友好 GUI 界面设计，界面由四个部分组成，包括原理示教、参数输入、模型展示和结果输出。在左下角的参数输入窗口，学生可像操作工程软件一样，直接修改定子槽尺寸、永磁体厚度、气隙长度、绕组电流幅值与相位、动子运动速度等数十个参数。

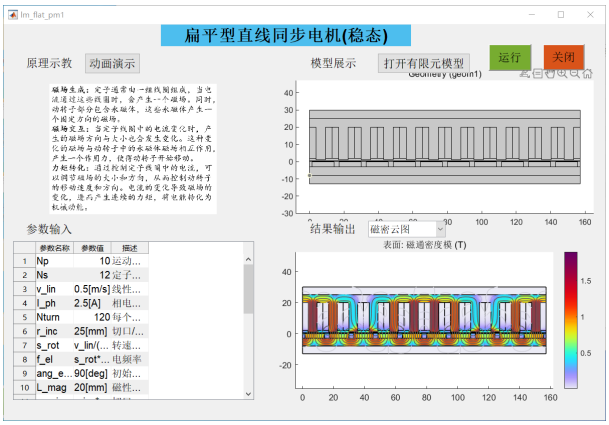


图 3　电机仿真 GUI 界面

呈现多维动态的可视化结果：左上角的原理示教窗口有文字介绍电机的工作原理，同时动画演示按钮提供了仿真动画，学生可以观察到随动子的变化，电机内部的磁场的动态变化，生动而形象；参数输入完成，右上角的模型展示窗口将自动显示电机的有限元模型，也可通过点击“打开有限元模型”按钮，直接调用 COMSOL Multiphysics 中的模型；一键仿真后，平台将在右下角的结果输出窗口中展示仿真结果，不仅提供磁场强度/磁感应强度的空间分布云图、磁力线动画，如图 3 所示，还能输出推力/速度随时间的变化曲线、绕组反电动势波形、损耗分布等。学生能清晰看到，增大电流如何使云图颜色变深（磁场增强），改变极距如何影响推力曲线的频率，气隙不对称如何导致磁力线畸变。

支撑分层分类的实验教学：平台实验分为“验证性”、“探究性”和“设计性”三个层次。例如，“验证性实验”要求学生复现空载反电势波形，并与理论公式对比；“探究性实验”要求扫描电流相位角，找到最大推力点并解释原理；“设计性实验”则可能挑战学生优化电机齿槽结构，以在给定约束下降低推力脉动。相关研究表明，交互式教学应用能够显著提高工程学生的学习效果[14]。

3.3 融合教学模式的设计与实施

本文将图谱与平台深度嵌入教学全流程，设计了三阶段混合式教学模式：

（1）课前——图谱导学与现象预览

教师发布与新课相关的知识图谱片段和引导性问题。学生利用图谱预习，明确本节知识在全局中的位置，并通过平台预览相关电机的空载运行动画或磁场图片，形成“前置直观印象”。

（2）课中——精讲互动与仿真深探

理论精讲：教师以知识图谱为“导航图”，串讲核心逻辑线。例如，在讲“电感”时，直接从图谱切入，回溯至“磁矢位-磁通-磁链”链条，并前跳到“电机绕组电感对性能的影响”，强调其工程价值。

实时仿真演示：讲解关键原理时，教师实时操作平台进行演示。例如，讲解“行波磁场产生推力”时，动态展示三相电流变化与气隙中移动磁场云图的同步关系，使抽象原理变为直观动画。

小组探究与即时验证：围绕“如何减小直线电机的端部效应？”等工程问题，学生分组讨论，提出假设（如改变端部绕组补偿），随即在平台上修改模型进行仿真验证，并即时对比分析数据，课堂变成小型“研发研讨会”。

（3）课后——巩固拓展与创造应用

实验报告撰写：学生完成平台上的规定实验，提交结合理论分析的数字化报告。报告需包含参数设置、结果图表、现象解释、误差或特殊性分析。

开放项目研究：作为高阶挑战，学生可自选或承接小课题，如“分析不同永磁体阵列对圆筒电机推力的影响”。他们需自主设计仿真方案，进行参数化研究，并撰写简要的“技术分析报告”。

个人图谱建构与反思：鼓励学生期末时绘制属于自己的“工程电磁场”知识总结图谱，或在教师图谱基础上进行个性化批注和延伸，促进元认知发展。

4 教学实践、效果评估与挑战

本方案已在我校 2022 级智能电网信息控制两个班

级中开展教学实践。

4.1 实施过程关键点

为确保改革效果，教学团队重点抓了三个环节：一是对教师进行系统培训，使其熟练掌握图谱教学法和仿真平台；二是精心设计每一讲的理论-仿真耦合点，确保仿真服务于理论深化，而非流于形式；三是建立过程性考核体系，将图谱学习笔记、仿真实验报告、项目研究表现纳入总评成绩。

4.2 综合效果评估方案

通过多元方式评估改革成效：

学生反馈调查：面向 2022 级智能电网信息控制专业两个班级共 59 名学生，发放问卷 59 份，回收有效问卷 56 份，有效回收率 94.9%。匿名问卷显示，92%的学生认为“知识图谱帮助我建立了课程的整体框架”，95%的学生表示“仿真实验让我真正看懂了以前无法想象的磁场”；88%的学生认为“这种学习方式提高了解决复杂问题的信心”。这一结果与概念点恢复教学法的研究结果一致，表明结构化教学能够显著提高学生的学习感知和表现[6]。

学业成绩分析：与采用传统教学的平行班（平行班为电气工程及其自动化专业的两个班级，两个专业大三之前课程一致，生源背景、师资配置、授课学时及期末试卷难度均相同）相比，实验班学生在“综合性应用题”和“现象分析题”上的平均得分高出 18%-25%（该百分比为实验班与平行班平均分的绝对差值，占题目总分的比例）。期末考试中，涉及空间场分布描述和参数影响分析的题目，实验班答题的准确性和深度明显更优。

能力行为观察：在后续的“大学生创新创业训练计划”和“课程设计”中，实验班学生表现出更强的主动运用仿真工具进行前期论证和性能分析的倾向。

后续课程教师反馈：“电机学”授课教师普遍反映，来自实验班的学生，对于“电枢反应磁场”、“气隙谐波磁场”等概念的理解更快、更透彻，在分析电机内部电磁过程时，思维更具空间感和系统性。

4.3 挑战

改革实施中也面临挑战：初期教师备课工作量剧增；部分学生习惯于被动听讲，对主动探究模式适应较慢；仿真平台对计算机硬件有一定要求。对此，我们通过建设教学团队共享资源、设计循序渐进的探究任务、提供集中的高性能计算机房访问等方式予以解决。国际工程教育领域的研究也表明，实施复杂工程问题和复杂工程活动时需要进行持续的质量改进[15]。

5 结论

本文针对工程电磁场课程的教学难点，提出了融合知识图谱与虚拟仿真的系统化改革方案。实践表明，知识图谱有效实现了课程知识的系统化重组与可视化呈现，帮助学生构建了清晰的认知框架；直线电机数值仿真实验平台则架起了理论与工程实践的桥梁，使抽象的电磁场分布与变化规律得以直观、交互地呈现，实现了“做中学、探中学”。

本次改革不仅是教学工具与方法的更新，更是教学理念从“知识传授”向“能力建构”的转变。它成功地将一门传统上被认为“枯燥难懂”的理论课，转变为一门“有趣、有用、有挑战”的、能够激发学生探究欲望和创新潜能的课程。

参考文献

[1] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论（第 2 版）[M]. 北京：高等教育出版社,2023.

[2] 史鹏飞, 谷钰钰. 工程教育认证背景下工程电磁场课程建设探索[J]. 科教导刊, 2025(6):33-35.

[3] 高深, 蔡纪鹤, 陈伦琼. 应用型高校工程电磁场课程教学改革的研究与探讨[J]. 大学教育, 2021(9): 110-112.

[4] 何芳, 张天然, 常路宾. 基于“知识+问题”图谱的“电路”智慧课程改革实践[J]. 电气电子教学学报, 2025, 47(5): 57-63.

[5] Mohamed Azmin N. F.; Mat Isa C. M.; Lee W.K.; et al. Implementation of complex engineering problem solving (CEP) and complex engineering activities (CEA) in malaysian engineering curriculum: a pilot study [C]//. 2023 International Conference on University Teaching and Learning (InCULT), 2023, pp. 1-6.

[6] Cho H. J.; Melloch M. R.; Levesque-Bristol C. Enhanced student perceptions of learning and performance using concept-point-recovery teaching sessions: a mixed-method approach[J]. International Journal of STEM Education, 2021, 8:32.

[7] 杭俊, 寻丽娜. 主线式教学法在“工程电磁场”中的应用[J]. 电气电子教学学报, 2025, 47(3):136-139.

[8] 王文敬, 小微. 基于知识图谱/AI 技术的新形态课程建设研究[J]. 教育教学论坛, 2025(16): 48-51.

[9] 马友忠. 基于课程知识图谱的智慧教学应用研究[J]. 河南教育, 2024(6): 84-86.

[10] 张红卫. 基于工程案例的工程电磁场教学实践研究[J].

电子元器件与信息技术, 2020, 4(12): 166-167.

[11] 刘晓斌, 蒋梅梅, 李可树. 电磁仿真工具在工程电磁场课程中的应用探索[J]. 科教导刊（电子版）, 2025(3): 10-12.

[12] 周凯, 杜一东, 孙渊. Mathematica 在工程电磁场可视化教学中的应用研究[J].科教导刊（电子版）, 2025(21): 1-3.

[13] Mina M.; Theh W. S. Facilitating students' learning and success in electromagnetism, reengineering mistakes[C]//. 2022 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), 2022, pp. 1-5.

[14] Corral Abad E.; Gómez García M. J.; Diez-Jimenez e.; Moreno-Marcos P. M.; Castejón Sisamon C. Improving the learning of engineering students with interactive teaching applications[J]. Comput Appl Eng Educ., 2021, 29(6), pp.1665–1674.

[15] Mohamed Azmin N. F.; Mat Isa C. M.; Lian O. C.; Asnawi A. L. Continual quality improvement in implementing complex engineering problems and complex engineering activities in malaysian engineering programs[C]//. 2024 IEEE 13th International Conference on Engineering Education (ICEED), Kanazawa, Japan, 2024, pp. 1-6.

版权声明：©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

OPEN ACCESS