

仿真辅助与项目实践融合的《工程电磁场》教学探索

刘 川, 汤品妍*, 李 燕, 周天益

宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波

收稿日期: 2026年7月27日; 录用日期: 2026年9月9日; 发布日期: 2026年9月17日

摘 要

《工程电磁场》理论抽象、数学推导较多, 学生易停留在公式记忆层面。针对课堂直观性不足、工程应用衔接不够和课后实践支撑有限等问题, 本文将电磁仿真引入课程教学, 构建课堂可视化演示、课后项目探究与理论验证相结合的教学模式。在教学方案设计方面, 围绕静电场、恒定磁场和准静态电磁场等内容设置仿真案例和项目任务; 在教学组织实施方面, 通过课堂演示、课后建模、报告撰写和答辩交流, 引导学生完成模型简化、仿真计算和误差分析。初步实践表明, 该模式有助于学生理解抽象的电磁场课程内容, 并在课程学习成效和实践能力相关指标上呈现积极改善, 可为课程教学改进提供参考。

关键词

工程电磁场, 仿真辅助, 探究式学习, 项目式教学, 工程能力培养

Exploring of Teaching Engineering Electromagnetic Field through Simulation-Assisted and Project-Based Practice

Chuan Liu, Pinyan Tang*, Yan Li, Tianyi Zhou

Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo Zhejiang

Received: July 27, 2026; accepted: September 9, 2026; published: September 17, 2026

*通讯作者。

文章引用: 刘川, 汤品妍, 李燕, 周天益. 仿真辅助与项目实践融合的《工程电磁场》教学探索[J]. 创新教育研究, 2026, 14(9): 368-375. DOI: 10.12677/ces.2026.149699

Abstract

The course Engineering Electromagnetic Field involves abstract theories and extensive mathematical derivations, and students may therefore focus mainly on memorizing formulas rather than developing a deeper understanding of the underlying concepts. To address the limited visualization in classroom teaching, the insufficient connection with engineering applications, and the lack of support for after-class practice, this study introduces electromagnetic simulation into the course and develops a teaching model that combines classroom visualization demonstrations, after-class project-based exploration, and theoretical verification. In terms of teaching design, simulation cases and project tasks are developed around topics such as electrostatic fields, steady magnetic fields, and quasi-static electromagnetic fields. In terms of teaching implementation, students are guided to complete model simplification, simulation analysis, and error analysis through classroom demonstrations, after-class modeling, report writing, and oral presentations. Preliminary results indicate that this teaching model helps students understand abstract concepts in electromagnetic field theory and leads to positive improvements in indicators related to course learning outcomes and practical abilities. This study may provide a useful reference for improving the teaching of related courses.

Keywords

Engineering Electromagnetic Field, Simulation Assistance, Inquiry-Based Learning, Project-Based Teaching, Engineering Ability Training

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

《工程电磁场》是电气工程、电子信息、通信工程等专业的核心基础课程，为电机学、电力系统分析、微波技术等后续课程提供理论支撑[1]。课程以麦克斯韦方程组为基础，涉及静电场、恒定磁场和时变电磁场等内容，需要综合运用矢量分析、微积分和偏微分方程等数学工具。由于电磁场本身难以直接观察，学生在学习过程中往往难以将数学表达式与物理图像联系起来，容易把课程理解为公式推导和习题计算，从而削弱了对工程应用价值的认识[2]。

围绕电磁场类课程教学改革，国内已有研究从工程案例引入、类比教学、混合式教学和仿真辅助教学等方面进行了探索[3]-[7]。国际上，项目式学习(Project-Based Learning, PBL)强调以具有实际背景的问题或任务组织学习，通过学生自主探究、协作交流和成果展示促进知识建构，教师主要承担任务设计和过程指导[8]。探究式学习则通常包括问题提出、方案设计、证据获取、结论形成以及交流反思等环节，重视学生依据证据修正原有认识的过程[9]。在电磁场教学中，已有研究将 MATLAB 编程、有限元计算等引入课程，通过计算机练习、解析计算与数值结果对照，帮助学生理解场分布及相关理论[10][11]。上述研究说明，将问题任务、计算工具和理论学习结合起来，有助于提高学生参与课程学习的深度。但现有研究较多关注仿真的可视化效果、软件操作或最终学习结果，对学生如何从理论判断出发完成模型简化、发现结果偏差并修正解释的过程呈现仍不充分。与完全开放的 PBL 相比，本文保留课程理论讲授，并由教师限定选题范围和阶段要求，属于具有教师指导的项目探究；其实施过程又与探究式学习中的问

题提出、证据分析、结论形成和交流反思相联系。基于此，本文将课堂可视化演示、课后项目建模和理论验证贯穿起来，在理论上探索 PBL 与探究式学习在电磁场课程中的具体衔接方式，在实践上形成包含模型简化、仿真计算、误差分析和答辩交流的教学流程。

2. 课程教学中存在的主要问题

2.1. 理论内容抽象，学生直观认识不足

《工程电磁场》不少概念需要结合场量分布、边界条件和空间关系理解。传统教学多以公式推导和例题讲解为主，空间图像呈现不足。例如，学生学习静电场边值问题、集肤效应等内容时，常能记住公式，却难以解释边界条件、材料参数和频率变化对场分布的影响。

2.2. 理论教学与工程应用衔接不够紧密

该课程与电容器电场分析、载流导体磁场计算、介质参数影响分析等工程基础问题密切相关，但受学时和实验条件限制，课堂上较难展开完整的建模过程。部分实验集中在简单参数测量，难以展示全场分布和参数变化过程。学生缺少模型简化、边界设置和结果分析训练，不容易把物理现象、数学模型、求解过程和工程含义联系起来。

2.3. 仿真工具应用深度有待提高

电磁仿真软件能够呈现场量分布和参数变化规律，是连接理论学习与工程应用的重要工具。但如果仿真只作为教师演示材料，学生仍处于观看和接受状态，难以理解建模、网格剖分、边界设置和结果验证的作用。课后任务若缺少理论验证要求，学生也容易把重点放在操作步骤上，而忽视结果是否符合基本物理规律。如何发挥其对主动思考和理论应用的支撑作用，是本文关注的重点。

3. 仿真辅助的探究式教学模式设计

针对上述问题，本文在课程教学中设计了课堂演示、课后探究和理论验证相衔接的教学模式(如图 1)。其基本思路是：课堂上利用仿真结果帮助学生形成直观认识，课后通过项目任务促使学生主动建模和分析，再通过理论计算或文献数据对仿真结果进行检验。该模式并不以软件操作替代理论推导，而是把仿真作为理解理论、发现问题和检验结果的辅助工具。

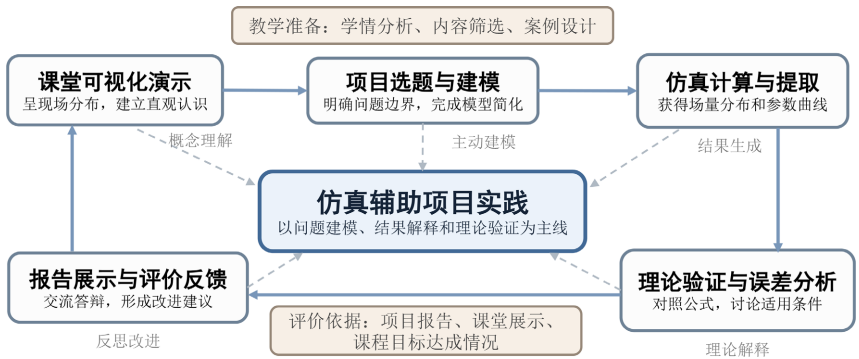


Figure 1. Simulation-assisted and inquiry-based project practice teaching model

图 1. 仿真辅助与探究式项目实践教学模式

3.1. 课堂演示环节：增强抽象概念的可视化理解

在课堂教学中，教师利用 COMSOL、CST 等软件对典型问题进行可视化演示，帮助学生理解抽象的

场论概念。以静电场边值问题为例,学生在用分离变量法求解拉普拉斯方程时,往往容易把注意力集中在级数展开过程上,而对边界条件如何影响场分布理解不够充分。教师以接地金属槽为例建立二维模型,设置矩形区域三个侧壁电位为零,顶盖电位为 φ_0 (如图2(a))。仿真得到的电位云图和电场线分布(如图2(b))显示,场量由高电位区域向接地边界逐渐衰减,等位线与边界之间具有明确的几何关系。通过这种展示,学生能够把解析解中的边界条件与图像中的场分布对应起来,从而加深对边值问题唯一性和物理意义的理解。

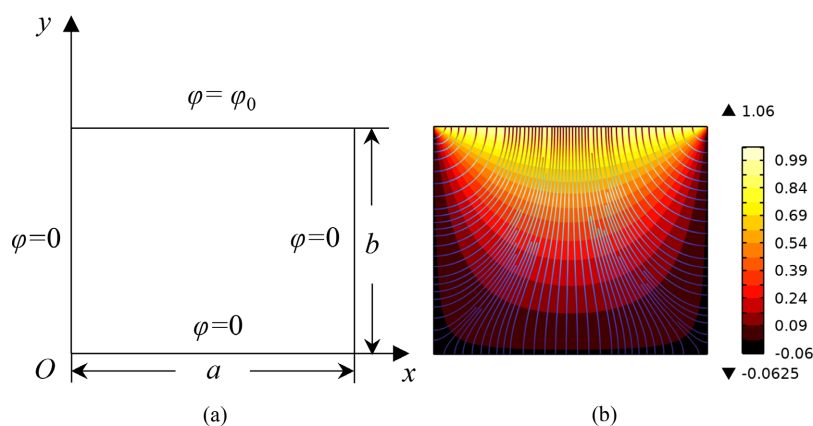


Figure 2. (a) Schematic diagram of the grounded metal slot, (b) potential and electric field line distribution of grounded metal slot

图 2. (a) 接地金属槽示意图, (b) 接地金属槽电位及电场线分布

在准静态电磁场教学中,集肤效应的频率依赖特性也是学生理解的难点。教材中的扩散方程解析解涉及较复杂的数学表达,学生不易直观理解电流密度为何随频率升高而向导体表面集中。教师在 COMSOL 中建立导体横截面模型(如图3),分别施加 50 Hz、1 kHz 和 1 MHz 的正弦激励。

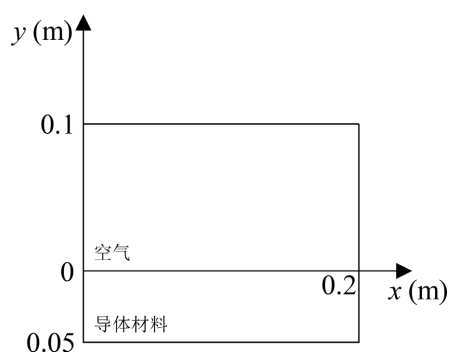


Figure 3. Schematic diagram of skin effect model

图 3. 集肤效应模型示意图

仿真结果表明,50 Hz 时电流密度在导体内部相对均匀,穿透深度可达毫米量级;频率升高后,电流逐渐集中于导体表面薄层,如图4所示。表1给出了不同材料在不同频率下集肤深度的仿真与理论计算结果。铝、铜在 50 Hz 和 1 kHz 频段的计算结果与理论公式较为接近;碳钢由于磁导率较高,高频下集肤深度较小,对网格精度提出了更高要求,1 MHz 下的碳钢结果未列入对比。通过频率、电流分布和集肤深度之间的对照,学生能够更具体地理解集肤效应的物理机制,也能认识到仿真计算中精度和计算量之间需要合理权衡。

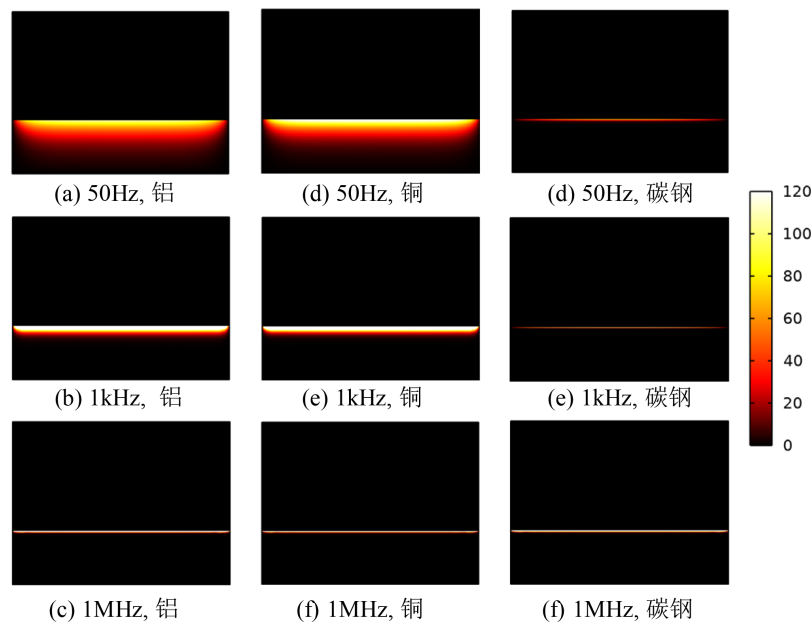


Figure 4. Surface current distribution results
图 4. 表面电流分布结果

Table 1. Simulated and theoretical skin depths of aluminum, copper, and carbon steel at different frequencies
表 1. 铝、铜和碳钢在不同频率下的集肤深度仿真与理论计算结果

频率/Hz	铝(仿真/理论)/mm	铜(仿真/理论)/mm	碳钢(仿真/理论)/mm
50	11.535/11.546	9.349/9.346	0.924/0.919
10 ³	2.585/2.582	2.089/2.090	0.205/0.205

3.2. 课后实践环节：以问题驱动学生主动建模

课后大作业采用项目式学习形式，要求学生以小组为单位完成一个与课程内容相关的电磁场问题分析。项目任务包括问题选择、物理模型简化、几何建模、材料参数设置、边界条件确定、网格剖分、结果提取和分析报告撰写等环节。选题既可以来自课堂案例的拓展，也可以来自有工程背景的应用，如平行板电容器和输电导线场分布分析等。通过这一环节，学生需要把实际问题转化为可计算的数学物理模型。

在项目实施过程中，教师不提供完整的操作模板，而是重点引导学生说明建模依据。例如，某小组选择分析载流导线周围的磁场分布，需要建立导线及周围空气区域模型，确定导线半径、电流大小、材料属性和计算区域范围，并设置适当的边界条件。学生在建模中会遇到网格质量不高、边界设置不合理、求解结果与理论规律不一致等问题。教师主要通过追问和阶段检查帮助学生排查原因，引导其从物理意义和数值计算两方面解释模型设置，而不是简单给出操作步骤。

3.3. 理论验证环节：强化仿真结果的物理解释

理论验证是课后项目的重要要求。学生需要将仿真数据与课程理论公式、解析解或已有文献数据进行对比，计算相对误差，并从模型假设、边界条件和网格设置等方面分析误差来源。通过这一过程，学生能够认识理论公式的适用条件，避免把仿真结果简单看作标准答案。

项目完成后，各小组提交包含问题陈述、建模过程、仿真结果、理论验证和误差分析报告，并进行课堂展示。答辩中，教师和其他小组围绕模型假设是否合理、参数选择是否有依据、误差分析是否充

分等问题进行讨论。通过这一过程，学生不仅完成了软件操作，也需要对仿真结果背后的物理意义作出解释。

3.4. 教学组织与实施条件

项目实施可安排 4~6 周，每组由 4~5 名学生组成，并设置任务确认、模型检查和成果答辩三个节点。学生需在课外完成理论分析、仿真建模、结果对比和报告撰写，建议每人投入 10~12 学时。教师除准备任务说明和建模示例外，还需检查各组模型设置、解答共性问题并组织答辩，前期准备约需 4~6 学时，每组的过程指导和成果评价约需 1~1.5 学时。通过阶段检查，可以及时发现边界条件、材料参数和网格设置中的问题，避免学生在项目后期集中修改。

项目评价可采用百分制，其中问题分析与理论依据占 15 分，模型简化与边界条件设置占 20 分，仿真过程与参数分析占 20 分，理论验证与误差分析占 25 分，报告规范性占 10 分，展示答辩与小组协作占 10 分。评分不以仿真图形数量作为主要依据，而是重点考查模型设置是否具有物理依据、结果是否经过理论检验，以及学生能否说明误差来源。对于小组项目，可结合任务分工记录和答辩中的个人回答确定成员成绩，减少小组内任务分配不均对评价结果的影响。

软硬件方面，可使用具备相应求解功能的常用电磁仿真软件，项目模型主要采用二维、轴对称或规模适中的三维形式，普通个人计算机即可完成计算。教师可提前提供软件基本操作说明、项目文件保存要求和报告模板，项目文件及报告通过课程平台统一提交。实施过程中，大班教学会增加模型检查和答疑工作量，可采用分组预约、集中讲解共性问题和统一检查表等方式提高指导效率；学生软件基础存在差异时，可在项目开始前安排基本操作训练，并由小组成员相互协助。为避免学生过度关注软件操作，阶段检查应要求其先说明理论依据，再展示仿真结果。

4. 教学实施与成效分析

该教学设计已在《工程电磁场与波》课程中进行了实践，改革实施班级评价对象为电气工程及其自动化专业学生。前期课程目标达成报告中，专业教学指导小组提出后续教学需要强化学生将理论应用于实践的能力，并注重过程管理。基于这一反馈，本文在原有课堂讲授和课后练习基础上，引入仿真辅助的大作业环节，并结合学生项目完成情况、课程目标达成报告和课堂答辩表现分析教学实施效果。

4.1. 项目完成与过程表现

从课后大作业情况看，学生选题主要集中在静电场和恒定磁场相关内容。部分小组选择分析平行板电容器在不同介质条件下的电容值变化，通过改变介质相对介电常数获得电容与介电常数之间的关系，并与理论值进行比较。也有小组建立多电荷系统的静电场模型，观察电位分布和电场线，验证电场叠加原理。另有小组选择同轴结构的电场分布与电容参数估算，通过轴对称模型获得场量分布，并与理论值进行对照。这些选题与课程基础理论联系较紧密，能够体现学生将课堂知识用于具体问题分析的尝试。

以平行板电容器项目为例，某小组研究极板尺寸、间距和介电常数对电容值的影响。学生先依据平行板电容公式判断变化规律，再用 COMSOL 建立两个极板及极板间空气区域，设置电位、接地边界和材料参数。计算后，仿真值比理论值偏大约 8%，检查参数后差异仍然存在。学生问：“参数按公式设置，为什么结果仍然偏大？”教师提示：“理论公式忽略了哪些因素？极板边缘是否仍为均匀电场？”学生据此观察边缘电场分布，调整极板尺寸与间距的比例，并细化边缘网格，比较不同模型的结果。最终，小组在报告中保留这一差异，将其主要归因于边缘效应，并讨论模型尺寸和网格精度的影响。该过程体

现了提出问题、检查模型、分析证据和形成解释的探究过程。

在项目推进中,多数学生能够完成基本建模和仿真结果输出,并能在报告中给出电位分布、电场线或参数曲线等结果。与单纯的习题训练相比,项目任务促使学生主动考虑模型边界、材料参数和结果解释等问题,对课程内容的理解有所加深。

4.2. 课程目标达成情况

基于成果导向教育(Outcomes-Based Education, OBE)理念的课程目标达成报告显示,实施仿真辅助与探究式项目实践后,课程基础理论相关目标均达到预设要求,说明学生对矢量分析基础和麦克斯韦方程组基本应用的掌握总体稳定。与工程电磁场问题分析和常用计算方法联系紧密的指标较改革前提高 0.55,增幅约 0.90%,合格比例提高 18.7%;与不同媒质中场分布规律理解相关的期末考核平均成绩提高 10.38 分,合格比例提高 17.9%。上述结果表明,该教学探索对提升学生工程应用意识、计算分析能力和场分布规律理解具有积极作用。

从教学实践过程看,学生项目选题覆盖静电场、恒定磁场和同轴结构电场分析等课程重点内容,能够围绕模型假设、边界条件和参数选取依据开展说明,并将仿真结果与理论公式进行对照。课堂展示和答辩环节进一步加强了学生对场分布图像、误差来源和公式适用条件的讨论。上述数据和过程表现共同说明,该教学模式能够促进学生从公式记忆转向模型分析和结果解释,教学探索取得了初步成效。

4.3. 实践反馈与持续改进

从理论框架看,本文模式与 PBL 均以具体任务组织学习,强调学生协作完成成果;与探究式学习相似,学生也需要经历提出问题、获取仿真证据、形成解释和交流反思等过程。本课程的知识范围、项目节点和基本要求由教师预先确定,学生主要围绕模型简化、参数设置和验证方案开展探究,因此更接近指导性项目探究。现有电磁场仿真教学研究已重视计算工具对理论理解的促进作用,但部分教学活动仍以教师演示、既定操作或结果展示为主,对建模依据、结果质疑和误差解释等学习过程呈现不足。本文在课堂演示之后设置课后建模任务,要求学生先依据课程理论分析问题,再通过仿真计算观察场量分布和参数变化,并用理论公式检查仿真结果,最后在报告和答辩中说明模型假设、结果差异及误差来源,使课堂讲授、项目实践和理论验证形成相互衔接的教学过程。

实践反馈表明,项目任务的实施需要与课程内容和学生基础保持适当匹配。后续教学中,可建立难度分层的参考选题库,提供若干理论关联清晰、建模难度适中的题目,允许学生在此基础上调整参数或拓展分析内容,使选题既贴近静电场、恒定磁场等课程重点,又具有一定工程背景。

同时,可在项目中设置阶段性检查点,要求学生先提交理论计算方案,再完成仿真结果对照。通过这种方式,学生能够在建模之前明确理论依据,在结果分析中关注整体场分布规律,从而进一步提高仿真结果解释的规范性。

此外,教师可在课堂示例和项目指导中进一步强调误差分析的基本思路,引导学生从边界条件、网格密度、模型简化和公式假设等方面解释计算结果。后续改革将继续完善选题库、报告模板和评价标准,把建模合理性、理论验证深度和误差分析质量纳入评价内容。在评价教学效果时,可在同一学期设置平行的实验班和对照班,保持教学内容、学时和考核要求基本一致,并报告各班参与研究的人数和有效样本量。数据呈现中应说明课程目标达成度、平均成绩和合格比例等指标的计算方法,列出相应的满分值和合格标准。在量化考核之外,可通过学生问卷了解概念理解、学习投入和仿真学习体验,并选择不同学习表现的学生开展半结构式访谈。将考核成绩、问卷结果、访谈材料、项目报告和课堂观察相互对照,可从不同角度分析教学实施情况,使研究结论得到多类证据的支持。

5. 结束语

本文针对《工程电磁场》课程理论抽象、实践支撑不足和仿真应用深度不够等问题,设计了仿真辅助与探究式项目实践相结合的教学模式。该模式以课堂可视化演示帮助学生建立场的空间认识,以课后项目任务引导学生完成建模和结果分析,并通过理论验证促使学生反思公式假设和模型适用条件。

教学实践表明,该设计在帮助学生理解抽象概念、增强工程建模意识方面具有一定作用。课程目标达成情况显示,工程应用相关指标较改革前提高 0.55,合格比例提高 18.7%;场分布规律相关期末考核平均成绩提高 10.38 分,合格比例提高 17.9%。上述结果说明,仿真辅助与探究式项目实践相结合的教学模式对提升学生模型分析和结果解释能力是有效的。后续教学中,将进一步完善分层选题库,加强项目过程指导,细化评价指标,使仿真工具更好地服务于《工程电磁场》课程的理论教学和工程能力培养。

基金项目

宁波大学教学改革研究项目:基于仿真软件的《工程电磁场》课程教学改革研究(JYXM2024134)。

参考文献

- [1] 焦超群. 类比教学法在“工程电磁场”教学中的实践[J]. 电气电子教学学报, 2023, 45(3): 153-156.
- [2] 徐国雄. 电磁场理论课程教学改革的探讨[J]. 当代教育实践与教学研究, 2019(20): 62-63.
- [3] 蒋涛, 等. 工程教育专业认证背景下的《工程电磁场》教学研究[J]. 中国电力教育, 2021(9): 61-62.
- [4] 吴轲娜, 赵文春, 刘月林. 基于工程案例的工程电磁场教学实践探讨[J]. 大学教育, 2019(9): 89-91.
- [5] 李慧, 白雪峰. MATLAB 在工程电磁场教学中的应用[J]. 教育教学论坛, 2015(27): 220-221.
- [6] 袁发庭, 韩珊珊, 唐波, 等. 仿真计算软件在“工程电磁场”课程教学过程中的应用[J]. 教育教学论坛, 2020(38): 258-259.
- [7] 方进, 吴爽. 变抽象为直观: “工程电磁场”课程教学中的仿真方法[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2018, 41(5): 444-448.
- [8] Kokotsaki, D., Menzies, V. and Wiggins, A. (2016) Project-Based Learning: A Review of the Literature. *Improving Schools*, 19, 267-277. <https://doi.org/10.1177/1365480216659733>
- [9] Pedaste, M., Mäeots, M., Siiman, L.A., de Jong, T., van Riesen, S.A.N., Kamp, E.T., et al. (2015) Phases of Inquiry-Based Learning: Definitions and the Inquiry Cycle. *Educational Research Review*, 14, 47-61. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2015.02.003>
- [10] Notaroš, B.M., McCullough, R., Manić, S.B. and Maciejewski, A.A. (2019) Computer-Assisted Learning of Electromagnetics through MATLAB Programming of Electromagnetic Fields in the Creativity Thread of an Integrated Approach to Electrical Engineering Education. *Computer Applications in Engineering Education*, 27, 271-287. <https://doi.org/10.1002/cae.22073>
- [11] Nogueira, A.F.L., Weinert, R.L. and Maldonado, L.J.A.S. (2019) Simulated Experiments for Teaching CAD Techniques Using Analytic and Finite Element Solutions of Electromagnetic Two-Dimensional Problems with Longitudinal Symmetry. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 11, 79-99. <https://doi.org/10.4236/jemaa.2019.116006>