

基于交互式仿真的电磁场与电磁波实践教学效果分析

杨汉武, 张泽海, 令钧溥, 宋莉莉, 舒挺

国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年12月16日; 录用日期: 2026年1月14日; 发布日期: 2026年1月23日

摘要

《电磁场与电磁波》课程理论抽象, 教学难度较大, 本研究实践验证了一种基于交互式仿真小程序的课堂实践教学模式的有效性。依托Falstad等免费网络资源设计了系列化实践教学模块, 仿真程序无需安装, 通过电脑、手机浏览器即点即用, 可对常见的电磁现象进行互动仿真。通过对连续两期教学实践收集的66份问卷数据进行了定性和定量分析, 实证检验了该模式的教学效果。结果表明: 在整体满意度、综合能力培养、分享合作等方面表现出显著提升($p < 0.05$)。研究表明, 低成本易获取的交互式仿真资源能有效降低抽象概念的理解门槛, 促进主动学习, 为同类课程的实践教学改革提供了经过实证检验的可行路径。

关键词

电磁场与电磁波, 实践教学, 交互式仿真, 教学实证研究, Mann-Whitney U检验

Analysis of Hands-On Learning Effectiveness of Electromagnetic Fields and Electromagnetic Waves Based on Interactive Simulation

Hanwu Yang, Zehai Zhang, Junpu Ling, Lili Song, Ting Shu

College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha Hunan

Received: December 16, 2025; accepted: January 14, 2026; published: January 23, 2026

Abstract

The course “Electromagnetic Fields and Electromagnetic Waves” is known for its highly theoretical and abstract concepts, presenting significant learning challenges. This study implements a hands-on learning model for the classroom that is based on interactive simulation applets, which require no installation, and allow for interactive simulation of common electromagnetic phenomena directly through web browsers on computers or mobile devices. Through quantitative analysis and qualitative analysis of 66 questionnaires collected from two consecutive teaching cycles, this study empirically examined the effectiveness of the model. The results indicate significant improvements ($p < 0.05$) in overall satisfaction, cultivation of comprehensive abilities and group cooperation. The research demonstrates that easily accessible interactive simulation resources can effectively lower the comprehension barrier for abstract concepts and promote active learning, thereby providing an empirically validated and feasible pathway for the reform of hands-on learning in similar courses.

Keywords

Electromagnetic Fields and Electromagnetic Waves, Hands-On Learning, Interactive Simulation, Empirical Teaching Research, Mann-Whitney U Test

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

《电磁场与电磁波》是电子信息类专业的核心基础课，其概念抽象、数学推导复杂，学生普遍反映难以建立直观物理图像。传统教学偏重理论讲授，虽有虚拟现实、专业仿真软件(如 CST、ANSYS)等辅助手段，但常因成本高昂、操作复杂、学习曲线陡峭等难以在课堂普及[1]-[4]。因此，探索一种低成本、易用性强、效果显著的实践教学模式具有重要的现实意义。本研究源于一项教学设想：利用互联网上基于浏览器的免费交互式仿真小程序(如 Falstad 网站[5]，phet 网站[6])构建虚拟实验室。此类资源无需安装，跨平台运行，极具便捷性，该方法在将抽象概念可视化、提供即时反馈以及促进主动学习方面展现出巨大潜力[7]-[10]。

为验证这一设想，我们开展了为期两轮的教学实践，并进行了系统的数据收集与分析。本文旨在回答以下研究问题：(1) 基于交互式仿真的实践教学能否显著提升学生的学习体验和兴趣？(2) 该模式对学生的实践能力与综合能力提升效果如何？(3) 教学实施过程中存在哪些问题？应如何迭代优化？

2. 研究方法与设计

本研究采用迭代设计，在两期教学循环(第一期：2024 年秋；第二期：2025 年秋)中持续优化。课程理论讲授 38 学时，实践教学 10 学时，围绕矢量场、静电磁场、波动、电磁波反射透射、波导模式等核心概念，设计了 5 个基于 Falstad 网站的交互仿真模块，部分模块如图 1 所示。教学流程强调“引导 - 探索 - 协作 - 分享”：教师简要演示后，学生以小组形式操作仿真，调整参数、观察现象，并讨论仿真结果与理论知识的联系，最后进行小组展示与集体研讨。以图 1(d)所示模块为例，学生在教师引导后，自行选择矢量场环路积分的探索，通过在场区中划设不同的积分环路，互动式仿真程序可即时给出积分结果，

便于学生与理论计算结果进行比对。同时, 改变积分环路的位置, 可即时观察到积分结果的不同, 便于学生深入理解矢量场的环路积分。学生通过一系列操作、观察、总结后, 开展小组展示与集体讨论, 进一步深化对所学内容的理解。

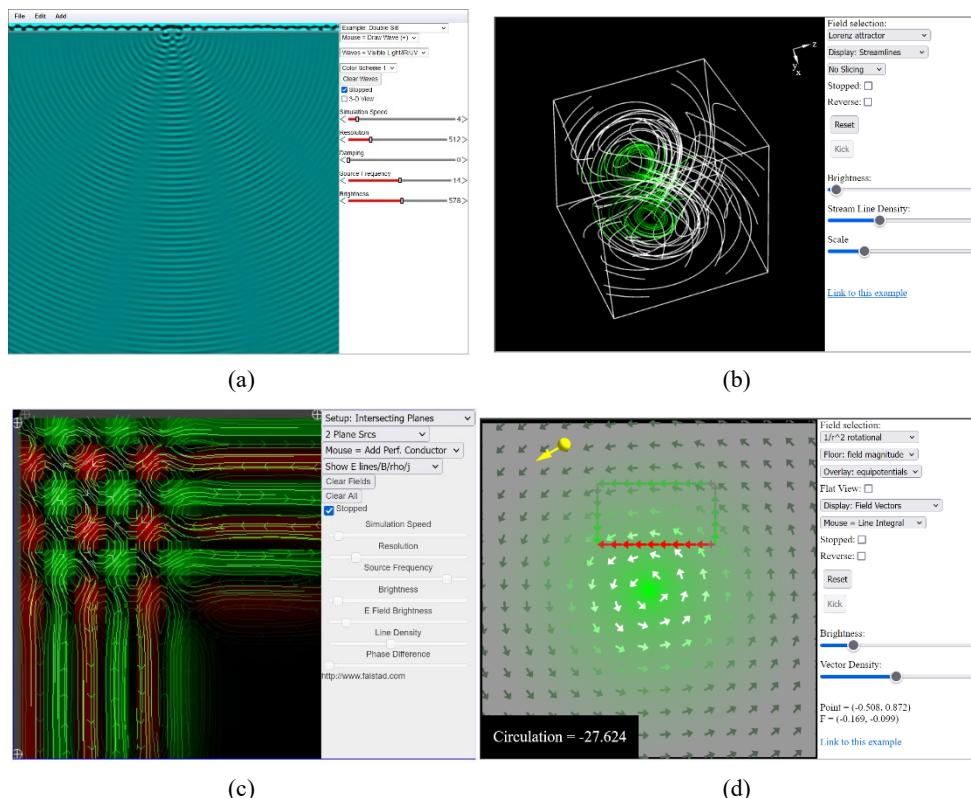


Figure 1. Examples modules of the hands-on learning. (a) Wave interactions; (b) Vector lines; (c) Intersection of two plane waves; (d) Calculation of curls

图 1. 部分实践教学模拟模块示例。(a) 波动干涉; (b) 矢量线表示; (c) 两个平面波相交; (d) 旋度计算

本研究采用问卷调查法, 共进行三轮数据收集: 在第一期(30 人教学班)的首末两次实践环节结束后和在第二期(12 人教学班)首次实践环节结束后发放匿名问卷。共回收有效问卷 66 份(第 1 次 26; 第 2 次 28; 第 3 次 12)。问卷采用了经典的“背景 - 过程 - 结果 - 建议”框架, 包含 9 个问题, 其中 7 个为 Likert 5 点量表题[11][12], 系统测量教学效果的不同维度; 1 个为多选题, 识别最有效的教学活动和学生偏好; 1 个为开放性问题, 收集个性化、深层次的反馈, 为量化数据提供背景和解释。调查问卷样卷如图 2 所示, 调查结果汇总如表 1 所示, 其中 Q1~Q8 的 3 个数字分别对应 3 次调查的学生反馈统计结果; Q9 的每一栏对应收到的开放性建议。

采用 Python 的 Scipy 库对定量数据进行统计分析。计算各题项的中位数(对极端值不敏感, 更适合 Likert 量表顺序数据)和四分位距(IQR 大对应学生意见分歧大), 并采用了 Mann-Whitney U 检验方法, 它适用于顺序量表数据非参数检验[13][14], 比较了一期与二期数据的显著性差异, 并通过效应量来评估差异的程度。

对开放性建议(Q9)进行了归类分析, 用于解释量化结果并发现潜在问题。

虽然本研究样本总量有限, 但相对于班级总人数(30 人, 12 人), 问卷回收率高, 避免了无应答偏差, 能够较好地代表所在班级学生的整体反馈。问卷采用匿名方式, 有效降低了学生因“讨好”心理而普遍

给予高分的倾向；更重要的是，数据内部呈现出良好的区分效度：学生在肯定整体满意度(Q1)的同时，也能明确指出独立操作(Q6)等具体环节的困难，这表明学生进行了认真、批判性的评价，而非盲目褒扬。另外，多轮次的纵向数据为观察教学效果的动态变化提供了可能。

实践教学后调查问卷（ 年 月 日）

本问卷匿名，仅用于收集教学效果反馈及改进研究，请放心画勾或填写

学习体验

1. 你对本次课堂实践教学的整体满意度如何？(1-非常不满意, 5-非常满意)

1口	2口	3口	4口	5口
----	----	----	----	----

2. 你认为课堂实践教学的内容是否与课程目标相符？(1-非常不符, 5-非常符合)

1口	2口	3口	4口	5口
----	----	----	----	----

学习兴趣

3. 课堂实践教学是否激发了你的学习兴趣？(1-完全没有, 5-非常有)

1口	2口	3口	4口	5口
----	----	----	----	----

4. 你在课堂实践教学中最感兴趣的的部分是什么？(可多选)

实验操作口21	互动环节口5	讨论分享口10	其他 (请注明): 在寻求答案过程中汲取知识	
---------	--------	---------	------------------------	--

实践能力

5. 你认为课堂实践教学对你的实践能力提升有多大帮助？(1-没有帮助, 5-帮助很大)

1口	2口	3口	4口	5口
----	----	----	----	----

6. 你在课堂实践中是否感到自己能够独立进行设计和操作？(1-完全不能, 5-完全能)

1口	2口	3口	4口	5口
----	----	----	----	----

综合能力

7. 你认为课堂实践教学对你的综合能力（如团队合作、问题解决能力等）提升有多大帮助？(1-没有帮助, 5-帮助很大)

1口	2口	3口	4口	5口
----	----	----	----	----

8. 你在课堂实践中是否有机会与同学合作并分享想法？(1-完全没有, 5-非常有)

1口	2口	3口	4口	5口
----	----	----	----	----

其他反馈

9. 你对课堂实践教学还有哪些建议或意见？

--

Figure 2. Sample questionnaire form

图 2. 调查问卷样卷

Table 1. Summary of questionnaire results (twice for first term, 30 ppl/class; once for second term, 12 ppl/class)
表 1. 调查统计结果(第一期 2 次, 30 人/班; 第二期 1 次; 12 人/班)

问题	选项 1	选项 2	选项 3	选项 4	选项 5
Q1 整体满意	2, 3; 0	2, 1; 0	3, 0; 0	8, 7; 1	11, 17; 11
Q2 目标相符	1, 1; 0	2, 1; 0	3, 1; 0	6, 7; 2	14, 18; 10
Q3 激发兴趣	2, 2; 0	0, 0; 0	5, 3; 0	5, 7; 4	14, 16; 8
Q4 喜好环节	21, 15; 7	5, 12; 3	10, 17; 8	(本题可多选)	
Q5 实践能力	0, 1; 0	3, 1; 0	6, 5; 0	9, 10; 6	8, 11; 6
Q6 独立操作	1, 0; 0	2, 3; 1	8, 6; 1	9, 10; 10	6, 9; 0
Q7 综合能力	2, 1; 0	1, 1; 0	5, 4; 0	13, 12; 5	5, 10; 7
Q8 合作分享	2, 1; 0	1, 1; 0	7, 3; 0	8, 9; 4	8, 14; 8
Q9 主观评价 (开放式建议)	对新的软件使用不熟练, 建议在预习中使用教学视频 组内成员不会, 也不听, 只能一个人搞 实践要求可以更加清晰、细致, 有更多的操作步骤、方法 希望能加强理论指导				
	实操时, 有时目标不是很明确 讨论分享环节可以多给一些时间 非常有趣 非常好				
	多组织一些 个人能力有限, 使用平台许多不明白, 有待学习 感觉网络限制太多, 无法很好达成目的 可以把同学们的案例统计一下, 当成一个实操的资源				

3. 研究结果与分析

3.1. 整体趋势定性分析

通过对 3 次数据的纵向比较, (1) 教学满意度呈整体上升趋势: 整体满意度、内容与目标契合度等核心指标在三次调查中均得分较高, 且最近一次最高。(2) 学习兴趣激发成效显著: “激发学习兴趣”项高分(4+5 分)选择率从 77% 升至 92%, 显示实践教学能有效提升学生投入度。(3) 能力提升获得认可: 实践能力和综合能力的提升得到学生充分肯定, 但“独立操作”自信心是持续的相对薄弱环节。(4) 合作机会充足, 个人操作指引待加强: 学生普遍认为合作分享机会充分, 但部分学生在独立操作和平台/工具使用上存在困难, 建议更清晰的任务指引和技术支持。(5) 班级差异: 第二期(2025)在多项指标上表现优于第一期(2024), 应与教学经验积累和迭代优化有关。(6) 开放性建议(Q9)主要集中于以下几点: 教学流程与指引——“操作步骤可以更清晰”、“希望加强理论指导”(主要出现在前两次); 资源与技术支持——“平台使用不明白, 有待学习”; 活动设计——“讨论分享环节可以多给一些时间”、“多组织一些”; 资源利用——“把同学们的案例统计一下, 当成一个实操的资源”; 团队协作——“组内成员不会, 也不听”。

3.2. 效果改进定量分析

对两期实践的调查结果进行了 Mann-Whitney U 检验来比较班级整体反馈的分布差异, 结果如表 2 所示。表中统计量 U 表示两组数据的差异程度, 取值越小差异越明显; p 值表示统计显著性, 越小越显著; 效应量 r 表示差异的量化取值, $r < 0.1$ 表示无显著差异, $0.1 \leq r < 0.3$ 表示中等程度的显著性, $r \geq 0.3$ 表示极显著的差异。尽管因调查问卷为匿名无法进行样本配对分析, 降低了统计检验效能, 但分析结果更为保守可靠, 任何观察到的显著差异都应解释为班级整体水平的变动, 而非个体学生的进步。

Table 2. Mann-Whitney U test results of key concerns
表 2. 关键指标 Mann-Whitney U 检验结果

调查指标	统计量 U	p 值	显著性	效应量 r	第一期样本数	第二期样本数
整体满意度	189.5	0.012	*	0.275	54	12
内容与目标相符	237.0	0.092	不显著	0.178	54	12
激发学习兴趣	264.0	0.267	不显著	0.123	54	12
实践能力提升	228.0	0.092	不显著	0.196	54	12
独立操作自信	336.5	0.833	不显著	0.026	54	12
综合能力提升	190.0	0.017	*	0.274	54	12
合作分享机会	210.0	0.043	*	0.233	54	12

注: * $p < 0.05$ 。

定量分析的主要发现如下。

(1) 学习体验与兴趣得到提升。描述性统计显示, 第二期在“整体满意度”(中位数 = 5, IQR=0)优于第一期(中位数 = 5, IQR = 1), 四分位距 IQR 减小表明学生的意见更加统一。Mann-Whitney U 检验证实, 这种差异具有统计学意义($p < 0.05$), 效应量为 $r = 0.275$, 属中等效应。这表明教学优化显著改善了学生的核心学习体验。开放性反馈中, “非常有趣”、“多组织一些”等评价, 与 Q4 “讨论分享”成为学生最感兴趣环节的量化结果相互印证, 说明交互式仿真成功营造了高参与度、高趣味性的学习氛围。

(2) 实践与综合能力培养的有效性得到验证。在能力提升方面, 第二期学生在“综合能力提升”(如团队合作、问题解决)和“合作分享机会”上表现出显著优势($p < 0.05$, 效应量 $r = 0.274, 0.233$)。这说明“小组合作 - 展示 - 讨论”的协作学习环境设计是成功的。然而, “独立操作自信”的提升不显著, 结合学生反馈中提到“个人能力有限, 使用平台许多不明白”和“感觉网络限制太多”。这表明, 尽管仿真工具本身易用, 但学生在将理论知识转化为自主探索的实践能力时, 仍需要更细致的教师辅导支持。

(3) 教学迭代优化得到证实。对比两轮教学, 显著性差异的形成并非偶然。它是对第一期学生反馈(如“目标不明确”、“讨论时间不足”)进行针对性改进的结果。例如, 第二期教学中强化了任务指引和理论联系, 并延长了讨论时间。效果量的客观数据(r 值在 0.2~0.3 之间)证明, 这些优化措施产生了具有实际教育意义的积极影响。

4. 讨论

1) 交互式仿真的核心价值是从“可视”到“互动”, 其核心优势在于创造了“假设 - 验证 - 观察”的主动学习循环。学生通过调整参数获得即时反馈, 将被动接受知识转变为主动建构知识。笔者团队在《电动力学》《数学物理方法》等教学中也部分采用了交互式仿真演示, 学生表示概念更加生动形象, 容易理解。

2) 目前 AI 工具层出不穷, 但技术的成功应用离不开教学法的精心设计。本模式将仿真工具嵌入协作学习情境, 促进了知识的社会性建构。另外, 遵循了“引导 - 探索 - 分享”的渐进式教学流程, 平衡了自主探索与有效指导。

3) 本研究的局限在于样本量有限, 且未进行长时程的追踪评估。但 3 次调查中“独立操作自信”均有不足, 给出了明确的改进方向。即尽管工具已经比较方便, 但未来需构建更完善的学习支持系统, 比

如针对平台基本操作和常见问题的预制微视频，提供更清晰的操作步骤和引导性问题，以及学生建议的汇总优秀操作案例形成资源库。

4) 本研究的纵向对比与横向对比基本提供了交互式实践的优势。(1) 尽管因匿名性无法进行配对样本分析，降低了统计检验效能，但 Mann-Whitney U 检验仍在整体满意度、实践能力和小组合作三个维度上检测到了显著的、具有中等效应量的提升。(2) 纵向与横向数据均显示多数指标的 IQR 在后期明显缩小，这表明教学效果从初期的有的环节好、有的环节一般的不稳定状态，逐渐发展为多数学生均能获得高质量体验的稳定、可复制的成熟模式。(3) 提升学生的独立操作自信是教学改进中的难点和深水区。这提示未来的改革需要超越课堂组织层面，深入技术支持和个性化反馈等更具挑战性的领域。

5. 总结

本研究通过实证数据显示基于易于访问的交互式仿真小程序在《电磁场与电磁波》实践教学中的有效性，特别是在改善学习体验、激发兴趣和综合能力方面效果突出。该模式资源获取方便、实施成本低，具备很强的可推广性。这一“轻量化、高互动”的实践教学范式，也为其他具有高抽象度特点的理工科课程改革提供了经过实证的参考案例。

通过两期实践对比分析，基于实时反馈的迭代优化能在短期内显著提升学生的学习体验和合作氛围，而经验的长期积累则能实现教学效果的全面优化。未来，我们将着力解决“独立操作自信”这一瓶颈，通过细化教学指导来进一步提升实践能力的培养效果，并探索在保护隐私的前提下，通过自动生成匿名编码等方式实现真正的纵向数据配对，从而更精确地刻画学生个体的成长轨迹，将教学研究推向深入。

基金项目

本研究受到国防科技大学教育教学研究课题资助。

参考文献

- [1] 汪丽丽, 邵莉, 周培祥. “知行合一”视域下《电磁场与电磁波》教学实践探索[J]. 科技视界, 2025, 15(18): 111-114.
- [2] 蔡洋, 田煜, 宋玲玲, 等. 基于移动端应用程序的电磁场与电磁波教学改革探索[J]. 高教学刊, 2025, 11(9): 138-141.
- [3] 高兵, 谭阳红, 朱彦卿, 等. 数字化和实践平台共同驱动的《电磁场与电磁波》教学探索[J]. 中国电力教育, 2024(11): 74-75.
- [4] 马晶, 马永强, 黄玲, 等. 工程教育背景下“电磁场与电磁波”教学改革[J]. 电气电子教学学报, 2023, 45(3): 10-14.
- [5] Math, Physics and Engineering Applets. <https://www.falstad.com/mathphysics.html>
- [6] Interactive Simulations. <https://phet.colorado.edu/en/simulations/filter?subjects=physics&type=html>
- [7] 杨峰, 宋玉冰, 郑珊珊. 教育心理学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2022.
- [8] 王德强, 邢斌, 主编. 教育心理学教育实践与学生发展取向的心理学研究[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2017.
- [9] Kaldaras, L. and Wieman, C. (2023) Introducing an Instructional Model for Teaching Blended Math-Science Sensemaking in Undergraduate STEM Courses Using Computer Simulations. arXiv: 2305.13451.
- [10] Osaci, M. (2018) Numerical Simulation Methods of Electromagnetic Field in Higher Education: Didactic Application with Graphical Interface for FDTD Method. *International Journal of Modern Education and Computer Science*, **10**, 1-10. <https://doi.org/10.5815/ijmecs.2018.08.01>
- [11] 徐芳, 刘二平, 邹伟, 等. 基于 Likert 量表的预防医学专业实践教学满意度调查[J]. 高教学刊, 2023, 9(8): 62-65.
- [12] La Rosa Longobardi, C.J., Piñas Rivera, L.C., et al. (2024) Factors Affecting Educational Quality: A Study Using Neutrosophic Likert Scales and Fuzzy Set Qualitative Comparative Analysis. *Neutrosophic Sets and Systems*, **71**, 23-31.
- [13] 孙允午, 张志杰, 主编. 统计学统计设计和数据搜集、整理与分析[M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2022.
- [14] 周文慧, 孙玉姣, 党媛媛, 编著. 应用统计分析[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2022.