

稀土及关键矿产特色大学物理实验数智化改革路径

廖晶晶

江西理工大学数理学院物理实验中心, 江西 赣州

收稿日期: 2026年9月25日; 录用日期: 2026年10月21日; 发布日期: 2026年10月28日

摘要

在教育数字化深入推进与稀土及关键矿产产业转型的双重背景下, 培养兼具物理基础、数字素养、工程实践与创新能力的复合型人才成为行业特色高校的重要任务。大学物理实验作为理工科人才培养的重要基础实践课程, 亟需在已有课程建设基础上进一步加强与特色专业、数智技术和工程实践的融合。本文依托国家一流本科课程, 立足“需求导向、学生中心、数智融合、虚实协同、持续改进”五位一体改革理念, 构建面向稀土及关键矿产领域的大学物理实验教学体系。以真实问题牵引重构分层实验内容, 以AI全过程辅助贯通实验教学链, 以虚实融合开放项目拓展自主探究, 以科研成果教学转化丰富创新实验资源, 以人机协同评价驱动教学持续改进。本文通过设计系统化改革路径, 为行业特色高校大学物理实验的专业化、数智化改革提供可复制、可推广的方案, 助力培养兼具家国情怀、实践能力和创新精神的复合型工程人才。

关键词

大学物理实验, 稀土及关键矿产, 数智化教学, 虚实融合, 开放探究

Digital and Intelligent Reform Pathways for University Physics Laboratory Teaching Featuring Rare Earths and Critical Minerals

Jingjing Liao

Physics Experiment Center, School of Mathematics and Physics, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi

Received: September 25, 2026; accepted: October 21, 2026; published: October 28, 2026

文章引用: 廖晶晶. 稀土及关键矿产特色大学物理实验数智化改革路径[J]. 教育进展, 2026, 16(10): 2104-2112.
DOI: 10.12677/ae.2026.16102325

Abstract

Against the dual backdrop of advancing educational digitalization and the transformation of the rare earth and critical mineral industries, cultivating interdisciplinary engineering talent with a solid foundation in physics, digital literacy, practical engineering competence, and innovation capability has become an important mission for industry-oriented universities. As a fundamental practical course in science and engineering education, on the basis of existing course development the University Physics Laboratory needs to further integrate specialty programs, digital and intelligent technologies, and engineering practice. Building on a national first-class undergraduate course, this paper develops a University Physics Laboratory teaching system for rare earths and critical minerals based on an integrated five-dimensional framework of demand orientation, student-centered learning, digital-intelligence integration, virtual-physical collaboration, and continuous improvement. Real-world problems are used to restructure tiered experimental content; AI-enabled support connects the entire teaching process; virtual-physical open-ended projects promote independent inquiry; the translation of research outcomes enriches innovative laboratory resources; and human-AI collaborative assessment supports continuous teaching improvement. By formulating a systematic reform pathway, this paper provides a replicable and scalable approach to the discipline-specific and digital transformation of University Physics Laboratory teaching in industry-oriented universities, contributing to the cultivation of interdisciplinary engineering talent with a strong sense of national responsibility, practical competence, and an innovative spirit.

Keywords

University Physics Laboratory, Rare Earths and Critical Minerals, Digital-Intelligent Teaching, Virtual-Physical Integration, Open-Ended Inquiry

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

1.1. 研究背景和意义

坚持思政引领、落实立德树人根本任务，是新时代高校教育教学改革的根本遵循。《教育强国建设规划纲要（2024—2035年）》明确提出塑造立德树人新格局、以教育数字化开辟发展新赛道，并强化教育对科技和人才的支撑作用[1]。《“十五五”规划纲要》提出围绕科技创新、产业发展和国家战略需求协同育人，并明确增强稀土、稀有金属等产业竞争优势，提高重要战略性矿产综合利用水平[2]。教育部等九部门《关于加快推进教育数字化的意见》提出推动人工智能融入教育教学全过程，建设“人工智能+X”国家级实验教学中心[3]。这些部署要求高校人才培养主动对接国家战略、科技创新和产业发展需求。

大学物理实验是理工科人才培养的重要基础实践课程，承担物理基础、科学方法、实践能力和科学品格培养等任务，也是课程思政、专业教育、数字技术与创新实践融合的重要载体。稀土及关键矿产产业向绿色化、智能化和高端化发展，迫切需要兼具家国情怀、物理基础、数字素养、工程实践和创新能力的复合型人才。将相关科研与工程问题转化为适合本科生的实验任务，有助于学生理解基础物理的工程价值，促进基础课程与专业培养有机衔接。

本文依托本校国家一流本科课程《大学物理实验》和稀土及关键矿产优势学科，以真实问题牵引实

验内容重构,促进科研成果教学转化,并通过 AI 辅助、虚实融合、开放探究和能力评价深化课程改革。研究有助于增强实验教学的专业适配性和数智化水平,提升学生实验操作、物理建模、数据分析、工程迁移和创新实践能力;同时将资源安全、绿色发展、科学家精神和工程伦理融入教学,强化学生的专业认同、责任担当和科技报国情怀,为行业特色高校大学物理实验改革提供参考。

1.2. 研究现状

国际上,本科物理实验教学逐步由验证既定规律转向开放式、探究式和研究性学习。美国物理教师协会发布的本科物理实验课程建议,将知识建构、物理建模、实验设计、实验技能、数据分析与可视化、科学交流列为实验课程的重要目标[4]。Wilcox 和 Lewandowski 的研究表明,适度引入开放性实验活动,有助于学生形成更加接近真实实验研究的认识和态度[5]。虚拟实验、计算仿真和数据工具进一步拓展了实验教学空间。Husnaini 和 Chen 发现,虚拟实验与实体实验在概念理解、实验规划、操作和改进等方面各具优势,应根据教学目标互补使用[6]。随着生成式人工智能进入实验导学、答疑和数据分析等环节,如何明确 AI、虚拟仿真与实体操作的功能边界,防止技术替代学生动手操作和独立思考,成为新的研究问题。

国内高校围绕大学物理实验改革,在分层实验、项目式教学、实验室开放、线上线下混合教学、虚拟仿真和 OBE 评价等方面开展了较多探索。李向富等将 OBE 理念、在线课程和虚拟仿真平台引入大学物理实验,强化教学过程与能力目标之间的联系[7];曾春华等通过视频演示、数据可视化和 AI 实验助手,探索了学生自主学习、过程智能跟踪和教师精准指导相结合的实践育人模式[8];蒋臣威等通过课程图谱、虚拟学习环境、AI 助教及智能评估功能,为个性化学习和教学诊断提供了新的实现路径[9]。这些研究为大学物理实验的数智化和发展性评价奠定了良好基础。

总体来看,现有研究多聚焦单项技术或通用实验情境,在特色专业真实问题转化、AI 与虚实实验全过程协同以及基于能力证据的持续改进等方面仍有深化空间。面向稀土及关键矿产领域系统重构大学物理实验,可为基础实验课程的专业化和数智化改革提供新的实践路径。

2. 课程建设基础与改革问题

2.1. 课程建设基础

江西理工大学《大学物理实验》是面向全校理工科本科生开设的独立实验课程,每年修读学生超过 3000 人。经过持续建设,课程已建成国家一流本科课程,形成基础实验、综合实验、设计与研究性实验三级递进体系,并将科研内容、创新实验与科学精神、学术诚信和团队协作教育融入教学全过程。课程已建成由自编教材、慕课和虚拟仿真实验组成的立体化资源体系,包括 33 段教学视频、300 余道自测题以及系列创新实验资源[10]。教学采用线上线下混合模式,学生课前完成视频学习、在线测试和虚拟预演,课中开展小组协作与实物操作,课后完成数据分析、实验报告和反思改进。课程实行过程性考核,并通过开放实验和物理创新竞赛拓展学生的创新实践空间,为本研究提供了良好的课程、平台和实践基础。

2.2. 改革需要解决的问题

现有课程已较好解决实验预习指导、资源建设、综合能力训练和课程育人等问题,但面向特色专业培养和数智教育仍需进一步深化。一是专业适配性有待增强。现有实验主要按照物理知识模块组织,与稀土、矿业、冶金和材料等专业真实问题的联系尚未形成系统映射,需要将适宜的科研与工程问题转化为安全、可操作的实验任务。二是数智资源协同仍需深化。现有慕课、在线测试和虚拟仿真主要服务于预习与操作指导,需要进一步发挥 AI 在导学、答疑、故障排查、数据分析和反馈诊断中的作用,形成虚

拟预演、实体操作与智能支持相衔接的教学链。三是开放探究覆盖面需要扩大。已有设计研究性实验和创新竞赛主要面向部分学生,需要将方案设计、实物验证、数据分析和成果汇报融入常态化教学,通过预约开放支持重复验证与装置改进。四是能力评价需要进一步细化。现有过程考核尚需明确不同层次实验的能力要求和证据来源,建立学生参与、AI辅助、教师判断相结合的评价机制,形成“评价-反馈-改进-跟踪-再评价”闭环。

3. 改革理念与总体框架

3.1. 改革理念

本研究以立德树人为根本任务,坚持“需求导向、学生中心、数智融合、虚实协同、持续改进”的改革理念。需求导向强调对接稀土及关键矿产领域人才培养要求,从科研与工程场景中提炼适合本科生的物理问题,增强基础实验与专业需求的联系。学生中心强调以能力发展和学习成果达成为出发点,突出学生在方案设计、实物操作、数据分析和实验决策中的主体地位,推动实验教学由步骤验证向自主探究转变[7][11]。数智融合强调依托已有在线课程、智慧平台和实验资源,发挥AI在导学、答疑、故障排查、数据分析和评价反馈中的辅助作用,同时坚持教师审核、学生实践和成果真实性要求[2]。虚实协同强调利用虚拟仿真开展参数预演和安全试错,以实体实验完成操作训练、现象观察和方案验证。持续改进则以能力达成证据为依据,通过学生反思、AI辅助分析和教师专业判断,及时调整实验内容、任务难度和指导方式。

3.2. 总体框架

本研究以稀土及关键矿产真实问题为牵引,以物理原理和实验方法为基础,以分层实验项目为载体,以数智技术为支撑,以实践能力提升为目标,构建“真实问题-物理原理-实验项目-能力目标-评价改进”一体化教学框架。

框架主要包括五条相互衔接的改革路径:一是建立真实问题与物理原理、实验项目和能力目标之间的映射,优化基础规范、综合设计和创新研究三级实验内容;二是整合在线课程、虚拟仿真、数据工具和AI辅助资源,贯通课前、课中与课后教学;三是按照任务发布、方案设计、虚拟预演、实体验证、数据分析和成果改进组织开放式项目教学;四是提炼科研中的建模、仿真和数据分析方法,与专业教师共同开发安全可行的特色创新实验;五是围绕操作、协作、分析、表达、设计和创新开展人机协同评价,形成评价、反馈、改进、跟踪和再评价闭环。五条路径共同服务于学生实验操作、物理建模、数据分析、工程迁移和创新实践能力培养,并将资源安全、绿色发展、科学家精神和工程伦理融入实验任务,实现知识学习、能力培养与价值塑造相统一。

4. 大学物理实验教学改革的实施路径

4.1. 真实问题牵引的分层实验内容重构

围绕稀土资源开发、矿物加工、冶金过程、功能材料、生态监测和新能源应用等领域,课程团队会同专业教师筛选与力、热、电、磁、光、声等知识相关且安全可行的真实问题,建立“真实问题-物理原理-实验项目-能力目标”映射[12]。真实问题不是作为传统实验的背景标签,而是经过降阶化、模块化和任务化处理,转化为学生能够完成的测量、设计、分析和改进任务。以转动惯量、电子束、静电场、等厚干涉、杨氏模量、温度传感、磁滞回线、示波器、整流滤波、电桥法、电表改装、分光计、声速测定及仿真实验等现有项目实验为基础,按照能力要求形成三个层次:基础规范实验侧重仪器使用、规范操作、数据记录和误差分析;综合设计实验由教师提出目标与条件,学生自主选择器材、设计方案和分析结果;

创新研究实验引入科研方法、真实数据或装置模块，支持参数优化、模型验证和拓展研究。通过分层重构，在保持物理实验基础训练功能的同时增强课程的专业适配性。

以等厚干涉实验为例，传统实验主要利用牛顿环测量透镜曲率半径，实验条件和操作步骤相对固定。改造后，将其转化为稀土发光或磁光薄膜厚度与均匀性监测任务。实验采用带有未镀参考区、折射率及标称厚度可查的功能薄膜教学样片，学生自主确定采样位置，采集不同区域的干涉图样，依据光程差关系计算局部厚度。数据处理不再局限于读取少量环纹直径，而是利用图像分析提取条纹位置，计算薄膜平均厚度、标准差和相对不均匀度，并与标称值及允许偏差比较。结论部分要求学生判断薄膜厚度是否达标，分析厚度不均匀对发光或磁光性能一致性的影响，并提出沉积或测量过程的改进建议。

以霍尔效应实验为例，传统实验主要验证霍尔电压与工作电流、磁感应强度之间的关系，并测定霍尔元件灵敏度。改造后，将其转化为钕铁硼永磁材料表面磁场分布与均匀性评价任务。学生首先标定霍尔传感器，自主设计扫描区域、测量间距和采样路线，再测量磁体表面或气隙内不同位置的磁感应强度；通过正反向测量消除零点漂移，形成二维磁场分布图，计算平均磁场、极差、梯度和相对不均匀度。实验结论不再停留于验证霍尔关系，而是判断磁场分布是否满足设定要求，区分边缘效应、测量误差与局部磁化不均，并讨论磁体排列或测量方案的优化方向。

上述改造使实验由已知规律验证和单一参数测量，转向面向未知样品的方案设计、多点数据分析和工程判断，学生需要综合运用物理原理、实验方法和数据证据解决具体问题，从而实现基础实验与专业需求的实质性融合。

4.2. AI 辅助的全过程数智实验教学

依托现有在线课程、智慧教学平台、虚拟仿真和数据分析工具，构建 AI 辅助的全过程实验教学体系。AI 实验助教主要采用基于大语言模型的生成式对话技术，并通过检索增强生成调用教师审核的实验资源；智慧教学平台用于分析预习、测验和任务完成情况，数据分析工具用于实验数据可视化、拟合方法推荐和异常数据提示。不同技术的功能及使用边界见表 1。

Table 1. AI technology types, core functions, and boundaries of use
表 1. AI 技术类型、核心功能及使用边界

技术类型	主要依据或数据	核心功能	使用边界
学习分析	预习记录、测验结果、任务完成情况	识别知识薄弱点，推荐学习资源和安全训练	只提供学习建议，不直接判定能力达成
大语言模型与课程资源检索	教师审核的原理、任务书、操作指导、故障案例和安全规范	原理答疑、方案启发、分级提示和排错支持报告	不提供完整方案、最终结论和实验报告
实验数据分析	学生提交的原始数据	数据可视化、拟合方法推荐、异常提示和误差分析	不修改原始数据，异常点须由学生实验核验
AI 辅助评价	原始记录、实验报告、平台过程数据和评价量规	检查材料完整性、归纳共性问题并生成初步反馈	不替代教师评价现场操作、实验决策及成果真实性

课前，学生先完成课程资源学习、安全测试并独立形成初步方案，AI 根据预习结果推荐相关内容，通过问题引导和分级提示帮助学生修订方案，教师重点审核开放任务及存在安全风险的方案。课中，学生自主完成装置搭建、参数调节、数据采集和实验判断；遇到问题时，须先记录实验现象、分析可能原因并提交初步判断，AI 再按照“原理提示 - 可能原因 - 检查项目”的顺序提供排错线索，并对实验数据

进行实时可视化,教师负责现场操作、安全规范和关键实验决策的指导。课后,AI辅助检查记录完整性,提示拟合方法、异常数据和可能的误差来源,学生结合原始记录、理论模型和仿真结果进行核验,解释是否采纳AI建议并提出改进方案,最终由教师结合实验报告、现场表现和答辩结果进行评价。AI辅助的实验教学链见图1所示。

为防止AI代替实验和思考,教学中实行“先做后问、逐级提示、操作禁替、过程留痕、现场核验”的使用规则。AI仅提供启发性和排错线索,不直接生成完整实验方案、最终结论和实验报告,不参与装置控制,不修改或删除原始数据。学生须保留交互记录,在报告中说明AI的使用环节、采纳内容及判断依据,并提交原始数据和修改过程。对高压、强磁和电子束等风险实验,AI仅提供经教师审核的安全提示,具体处置以教师现场指导为准。通过操作考核、随机提问和成果答辩核验学生的真实能力,形成学生主体、AI辅助、教师指导与把关的协同教学关系[13]。



Figure 1. AI-assisted experimental teaching chain: pre-lab guidance → virtual simulation → hands-on experimentation → data analysis → assessment

图 1. AI 辅助的“导学→预演→实做→分析→评价”实验教学链

4.3. 虚实融合的开放式项目教学

项目教学包括任务发布、方案设计、虚拟预演、实体验证、数据分析、成果汇报与改进六个环节。学生以小组为单位讨论实验方法、搭建装置、调节参数、采集数据和排查故障,并通过报告、答辩或作品展示说明实验结果的物理意义和工程价值。该过程增加学生自主设计和实验迭代的机会,推动实验由规定步骤验证向开放探究转变[14]。

完成安全培训和基础操作考核后,学生可预约实验室开展重复测量、方案改进和创新研究。鼓励不同专业学生组队,在实验设计、数据分析和成果表达中发挥各自专业优势。

4.4. 科研成果向特色创新实验转化

依托课题组在复杂粒子体系、物理建模、数值仿真和数据分析等方面的科研成果,提炼粒子运动、外场调控、参数优化和模型验证等物理问题与研究方法;结合学校稀土及关键矿产优势学科中的真实问

题，由课题组与相关专业教师共同论证，形成安全可行的特色创新实验项目。可开展实物实验的内容转化为装置搭建、参数测量和方案优化任务；涉及高温、高压、大型装备或高耗材的内容，采用虚拟仿真、真实数据分析和局部实物验证等方式进行降阶。每个项目形成包含科研来源、物理问题、实验目标、实施条件、设计要求、数据处理、安全规范和评价标准的完整方案，纳入特色创新实验项目库，并与设计研究性实验、物理创新竞赛和 CUPT 选题衔接。

4.5. 人机协同的能力评价与持续改进

在现有过程考核、小组评价和综合实验考核基础上，以 OBE 能力达成为导向，围绕准备与安全、操作与协作、数据分析、总结反思、方案设计和创新拓展制定分层量规。基础实验侧重规范操作和数据处理，综合实验侧重方案设计与问题解决，创新项目侧重实验决策、方案改进和成果创新，权重随实验层次调整。评价证据包括平台记录、原始数据、现场操作、实验报告、答辩和项目成果；学生自评互评用于过程反思，AI 辅助数据汇总、记录检查和问题诊断，教师核验现场操作、工程判断及成果真实性。竞赛、论文、专利等拓展成果与开放实验、装置改进或研究报告实行等值认定。依据能力目标达成情况，形成过程采集、能力评价、问题诊断、教学调整、跟踪验证、再评价闭环(图 2)，动态优化实验内容、任务难度、开放条件和指导方式[15]。



Figure 2. Human-AI collaborative loop for practical competency assessment and continuous improvement
图 2. 人机协同的实践能力评价与持续改进闭环

5. 实施保障与现实挑战

该改革涉及基础物理、特色专业、实验技术与人工智能的交叉融合，实施过程中仍面临师资、资源、协作和技术应用等现实挑战，需要建立与改革内容相适应的保障机制。

首先，教师的复合能力有待提升。大学物理教师熟悉实验原理和教学规律，但对稀土及关键矿产工程场景的了解可能不足；专业教师掌握产业问题，却未必熟悉基础物理实验的教学要求。为此，应由物理教师、专业教师和实验技术人员组成协作团队，共同完成问题筛选、实验设计、安全论证和评价标准

制定。通过联合备课、实验研讨和操作培训，逐步提高教师将专业问题转化为基础实验任务以及运用 AI 和学习数据辅助教学的能力。

其次，真实产业问题往往涉及大型设备、高温高压环境、贵重样品或复杂测试条件，难以直接搬入本科实验室。项目设计应以保持核心物理机制和研究方法为原则，采用教学样品、模块化装置、虚拟仿真、典型数据分析和局部实验验证等方式进行降阶处理。依托现有国家一流课程资源、智慧教学平台和实验设备，优先更新可重复使用的实验指导、数据资源和评价量规；同时实行设备分级开放和预约管理，保障实验安全与资源利用效率。

再次，跨学科协作可能受到课程安排、专业语言和评价标准差异的影响。每个融合项目应形成统一的项目说明书，明确问题情境、物理原理、实验条件、预期成果、安全要求和评价证据。物理教师负责原理及教学设计，专业教师负责工程情境和技术指标审核，实验技术人员负责装置运行与安全保障，并根据教学反馈共同更新实验内容，避免专业案例与物理实验相互割裂。

最后，AI 应用可能带来内容失真、学生依赖和数据安全等问题。AI 助教应基于教师审核的课程资源提供分级提示，生成内容须标明辅助性质并由学生进行实验核验。通过保留交互记录、提交原始数据、说明 AI 使用过程以及开展操作考核和答辩，确认学习成果的真实性；学生数据实行匿名化处理，涉及安全和关键实验决策时以教师现场判断为准。

因此，不同高校可结合自身优势学科和实验条件选择适宜项目，不必追求技术工具和资源数量，而应以物理联系真实、实验安全可行、学生能力可评价和改革效果可验证为基本标准。

6. 结论与展望

教育数字化深入推进以及稀土与关键矿产产业绿色化、智能化和高端化发展，对行业特色高校复合型工程人才培养提出了新的要求。大学物理实验作为连接基础物理知识、科学实验方法与工程实践的重要课程，需要在已有建设成果上进一步增强专业适配性、开放探究性和数智化水平。

本文以立德树人为根本，坚持“需求导向、学生中心、数智融合、虚实协同、持续改进”的改革理念，构建“真实问题-物理原理-实验项目-能力目标-评价改进”一体化框架，形成五条相互支撑的改革路径：以稀土及关键矿产真实问题牵引分层实验内容重构，以 AI 全过程辅助贯通课前、课中和课后教学，以虚实融合开放项目拓展学生自主探究，以科研成果教学转化丰富特色创新实验，以人机协同评价推动教学持续改进。该路径不是简单叠加专业背景或数字工具，而是在保持学生实物操作和自主决策核心地位的基础上，促进实验内容、教学过程、科研资源和能力评价协同改革，推动大学物理实验由通用验证训练向真实问题驱动、工程情境融入和创新实践拓展。本研究将资源安全、绿色发展、科学家精神和工程伦理融入实验任务，在提升学生实验操作、物理建模、数据分析和工程迁移能力的同时，强化其专业认同、责任担当和科技报国情怀。所构建的改革路径既可为稀土、矿业、冶金和材料等专业的基础实验教学提供支撑，也可为行业特色高校推进基础课程与专业教育、数字技术和创新实践融合提供借鉴。

后续研究将依托平行班开展两轮教学实践，综合现场操作、原始记录、实验报告、平台数据、项目成果和问卷访谈，比较学生改革前后以及实验班与对照班的能力变化，检验各项改革措施的实施效果。根据评价结果持续优化实验任务、开放条件、AI 辅助方式和能力评价标准，并重点关注 AI 生成内容的准确性、学生技术依赖、成果真实性和教学数据安全。在实践验证和迭代完善的基础上，逐步将相关资源与教学模式推广至其他工科专业及同类行业特色高校。

基金项目

江西省普通本科高校教育教学改革研究课题，面向稀土及关键矿产特色的大学物理实验教学数智化

改革与实践。

参考文献

- [1] 中共中央 国务院印发《教育强国建设规划纲要（2024—2035 年）》[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/202501/content_6999913.htm, 2025-01-19.
- [2] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要[EB/OL]. <https://www.12371.cn/2026/03/13/ART11773410307876581.shtml>, 2026-03-14.
- [3] 教育部等九部门关于加快推进教育数字化的意见[EB/OL]. https://www.moe.gov.cn/srcsite/A01/s7048/202504/t20250416_1187476.html, 2025-04-11.
- [4] AAPT Committee on Laboratories (2015) AAPT Recommendations for the Undergraduate Physics Laboratory Curriculum. American Association of Physics Teachers.
- [5] Wilcox, B.R. and Lewandowski, H.J. (2016) Open-Ended versus Guided Laboratory Activities: Impact on Students' Beliefs about Experimental Physics. *Physical Review Physics Education Research*, **12**, Article ID: 020132. <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.12.020132>
- [6] Husnaini, S.J. and Chen, S. (2019) Effects of Guided Inquiry Virtual and Physical Laboratories on Conceptual Understanding, Inquiry Performance, Scientific Inquiry Self-Efficacy, and Enjoyment. *Physical Review Physics Education Research*, **15**, Article ID: 010119. <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.15.010119>
- [7] 李向富, 郑兴荣, 曹鹏飞, 等. 基于 OBE 理念的大学物理实验教学的改革与实践[J]. 物理与工程, 2024, 34(3): 42-48.
- [8] 曾春华, 王旭明, 李敬源. 数智化背景下大学物理实验课程的实践育人路径探索[J]. 物理与工程, 2025, 35(3): 138-141.
- [9] 蒋臣威, 方爱平, 王兴, 等. 人工智能赋能大学物理智慧课程建设研究与实践[J]. 物理与工程, 2025, 35(5): 154-157.
- [10] 江西理工大学. 大学物理实验[EB/OL]. <https://www.xueyinonline.com/detail/216845119>, 2026-09-15.
- [11] 李红, 杨新建. 面向拔尖创新人才培养的基础学科教学模式改革——以大学物理课程为例[J]. 高等理科教育, 2023(6): 10-18.
- [12] 唐笑年, 段彬, 王潇潇. 以学启创 以创促学 构建物理学引领多学科融合的创新实践教学模式[J]. 物理与工程, 2024, 34(5): 69-73, 81.
- [13] 管佳, 韩婷芷, 徐国兴. 人工智能技术赋能我国高等教育拔尖人才培养[J]. 中国电化教育, 2022(10): 97-101.
- [14] Adamczyk, P.D., Eadkhong, T. and Sirisathitkul, C. (2025) Integrating Problem-Based Learning into the First-Year Physics Laboratory Course: A Post-Covid-19 Scenario at Walailak University, Thailand. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, **21**, em2562. <https://doi.org/10.29333/ejmste/15801>
- [15] 郭巧能, 陈秋芳, 宋平新, 等. 面向拔尖创新人才培养的大学物理课程思政教学评价定量分析研究[J]. 大学物理, 2025, 44(9): 80-86, 102.