

基于设计研究的工科研究生课程改革与实践

——以《辐射测量与仪器》研究性教学模式构建为例

夏文明, 龚军军, 杜志辉, 门金凤

海军工程大学核科学技术学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年11月1日; 录用日期: 2025年11月30日; 发布日期: 2025年12月10日

摘要

为深化研究生对辐射测量原理的理解并强化其工程实践能力, 本研究在《辐射测量与仪器》课程中实施了以“不同类型辐射测量仪器的设计与实现”为核心的研究性教学改革。通过将课程知识点融入完整的仪器设计与实现流程, 引导学生经历从需求分析、方案设计、模块选型、软硬件实现到系统测试的全过程。实践表明, 该模式有效激发了学生的主动探索精神: 所有学生小组均成功完成了辐射测量仪器的原型样机的开发, 其设计方案在创新性和可行性方面获得行业专家的肯定; 学生在系统设计、工程实现和问题解决等方面的能力得到显著提升, 多项设计成果展现出实际应用潜力。本改革验证了以仪器设计与实现为载体的实践教学模式对培养工科研究生工程创新能力的重要价值, 为同类课程建设提供了具有参考意义的实施范式。

关键词

研究性学习, 仪器设计, 工程实践, 教学改革, 辐射测量

Design-Based Research on Engineering Graduate Course Reform and Practice

—A Case Study of Developing a Research-Based Teaching Model for “Radiation Measurement and Instruments”

Wenming Xia, Junjun Gong, Zhihui Du, Jinfeng Men

College of Nuclear Science and Technology, Naval University of Engineering, Wuhan Hubei

Received: November 1, 2025; accepted: November 30, 2025; published: December 10, 2025

Abstract

To deepen graduate students' understanding of radiation measurement principles and enhance their

engineering practical abilities, this study implemented a research-oriented teaching reform in the “Radiation Measurement and Instruments” course, centered on the “design and implementation of different types of radiation measurement instruments.” By integrating course knowledge points into the complete process of instrument design and implementation, students were guided through the entire workflow—from requirements analysis, scheme design, and module selection to software/hardware implementation and system testing. Practice has demonstrated that this model effectively stimulates students’ initiative in exploration: all student groups successfully developed prototype instruments for radiation measurement, with their design solutions receiving recognition from industry experts for innovation and feasibility. Students’ capabilities in system design, engineering implementation, and problem-solving showed significant improvement, and several design outcomes demonstrated potential for practical application. This reform validates the importance of a practice-oriented teaching model, based on instrument design and implementation, for cultivating the engineering innovation capabilities of graduate engineering students, providing a referential implementation paradigm for the development of similar courses.

Keywords

Research-Based Learning, Instrument Design, Engineering Practice, Teaching Reform, Radiation Measurement

Copyright © 2025 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

辐射测量技术是核科技、环境监测、资源勘探及医学物理等领域的共性关键技术，其发展与创新直接关系到国家能源安全、环境安全与公共健康水平。作为培养相关领域高层次人才的核心课程，《辐射测量与仪器》的教学目标不仅在于传授辐射物理与探测器原理等理论知识，更在于培养学生面向复杂应用场景，设计与开发辐射测量系统的创新实践能力。然而，传统的课程教学模式普遍存在“重理论、轻设计”、“重原理分析、轻工程实现”的倾向[1]，教学内容与前沿工程实践存在脱节，学生难以将抽象的物理原理与公式转化为解决实际测量问题的系统方案与实物装置，制约了其创新设计与工程实现能力的有效培养[2]。

从教育心理学视角来看，传统教学模式学生面对复杂的仪器设计任务时，容易因信息量过大而产生较高的认知负荷，影响学习效果。根据认知负荷理论，教学设计应通过合理组织学习材料与任务结构，降低外在认知负荷，促进图式构建与自动化处理[3]。此外，建构主义学习理论强调知识是在解决真实问题的过程中主动建构的，而非被动接收[4]。这些理论为改革提供了重要依据。

为破解上述困境，本研究以工程教育中的“设计-实现”(Design-Build)理念与研究性学习模式为指导，在《辐射测量与仪器》课程中开展了以“不同类型辐射测量仪器的设计与实现”为载体的教学改革。我们假设，通过让学生亲历从需求分析、方案设计、模块选型、软硬件实现到系统测试的完整仪器开发流程，能够深度激发其学习自主性，促进知识融合与能力转化，从而有效培养其系统思维与工程创新能力。

那么，这种以仪器设计与实现为核心的研究性教学模式，其实际效果如何？它能否在夯实理论基础的同时，显著提升学生的工程设计能力与创新自信？为科学地回答这些问题，本研究采用实证方法，通过对学生设计成果的系统评估、学习成效的量化分析以及学习体验的质性探究，对本次教学改革的成效

进行全面检验，旨在为工科研究生课程的实践教学模式创新提供可资借鉴的案例与证据。

2. 研究性教学改革的设计

为有效解决传统教学模式中理论与实践脱节的问题，培养研究生的工程创新能力和系统设计思维，本研究在《辐射测量与仪器》课程中实施了以“仪器设计与实现”为核心的研究性教学改革[5]。改革方案围绕“设计 - 实现 - 测试”的工程教育理念，构建了完整的教学实施框架。

2.1. 教学目标的重新定位

基于工程教育认证的 OBE 理念[6]，我们将课程目标从单一的知识掌握转向多元能力培养，确立了以下三个层次的教学目标：

1) 知识整合层面

学生能够系统运用辐射物理、探测器原理、电子学基础等知识，针对特定测量需求，完成仪器方案的原理设计与参数计算。

2) 工程实践层面

- ① 掌握辐射测量仪器的设计流程与方法，具备方案论证、模块选型、系统集成能力；
- ② 能够独立完成信号调理电路的设计与调试，解决实际测量中的噪声抑制、信号处理等问题；
- ③ 具备系统测试与性能评估能力，能够制定测试方案，分析测量数据，优化仪器性能。

3) 创新能力层面

培养学生在仪器设计中的创新意识，鼓励在探测方法、系统架构或数据处理等方面提出创新性解决方案。

2.2. 设计任务的设计原则

为确保教学效果，设计任务的选择遵循以下原则：

1) 典型性与差异性

任务覆盖不同类型辐射探测器(如 GM 计数管、闪烁探测器、半导体探测器等)和不同测量目标(如剂量率测量、能谱分析、放射性核素识别等)，保证学生接触到辐射测量仪器的典型技术路线。

2) 挑战性与可行性

任务难度设置在学生的“最近发展区”，既需要综合运用多学科知识，又确保在课程周期内可通过努力完成。例如：“基于 SiPM 的便携式 γ 剂量率仪设计”、“基于 α/β 甄别的表面污染监测仪的开发”等。

3) 开放性与创新空间

任务书仅规定核心指标和要求，在探测方法、电路方案、数据处理算法等方面留有充分的创新空间，鼓励学生提出个性化解决方案。

2.3. 教学过程的系统重构

将传统的“理论讲授 + 验证实验”模式进行重构，构建了如图 1 所示的以设计项目为主线的四阶段教学模式：

第一阶段：需求分析与方案设计(第 1~2 周)

- 1) 学生以小组形式，根据选题进行文献调研和技术分析；
- 2) 完成仪器总体方案设计，包括探测器选型、信号处理链路设计、关键参数计算；
- 3) 提交详细设计方案并进行小组答辩。

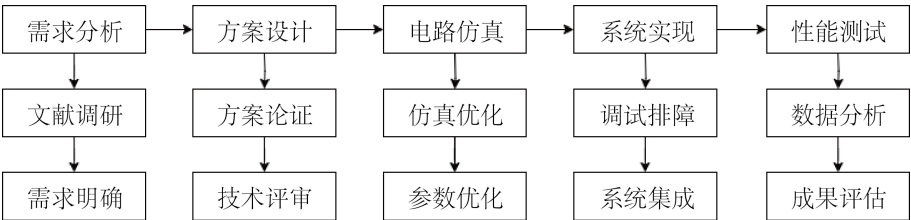


Figure 1. The teaching process after restructuring
图 1. 重构后的教学过程

第二阶段：核心电路设计与仿真(第 3~4 周)

- 1) 重点完成前置放大器、主放大器、甄别器等核心电路的设计；
- 2) 使用电路仿真软件进行性能验证和参数优化；
- 3) 完成电路设计和模块选型。

第三阶段：系统实现与调试(第 5~8 周)

- 1) 完成电路板制作和元器件焊接；
- 2) 进行各模块调试和系统联调；
- 3) 解决实际调试中出现的电磁兼容、噪声干扰等问题。

第四阶段：性能测试与成果总结(第 9~10 周)

- 1) 制定详细的测试方案，对仪器的主要性能指标进行测试；
- 2) 分析测试数据，评估仪器性能，提出改进方案；
- 3) 提交完整的仪器设计报告并进行成果展示。

2.4. 评价体系的改革

建立多元化的过程性评价体系，重点考察学生的工程实践能力和创新思维：

- 1) 设计方案质量(30%)：评估方案的科学性、创新性和可行性；
- 2) 实现过程表现(30%)：考察电路设计能力、调试解决问题能力和团队协作精神；
- 3) 系统完成度(20%)：评价仪器原型的功能完整性和性能指标；
- 4) 总结报告与答辩(20%)：评估系统总结能力和学术表达水平。

该教学设计的创新之处在于将课程知识点有机融入完整的仪器开发流程，通过“做中学”的方式，使学生在解决实际工程问题的过程中，实现知识建构与能力提升的有机统一。

3. 研究性教学改革实施过程

在前期精心设计的基础上，本研究性教学改革在 2023~2024 学年春季学期正式实施，选课研究生共 12 人，分为 3 个研究小组。整个实施过程以“仪器设计与实现”为主线，通过完整的工程实践流程，培养学生的系统思维和创新能力和学术表达水平[7]。下面将以“基于 SiPM 的便携式 γ 剂量率仪设计与实现”为例，详细阐述具体实施过程。

3.1. 案例背景：面向实际应用的辐射监测仪器开发

随着辐射监测需求的日益增长，便携式、高灵敏的辐射监测仪器具有广阔的应用前景。本案例选择“基于 SiPM 的便携式 γ 剂量率仪”作为设计任务，主要基于以下考虑：

1) 技术先进性

硅光电倍增管(SiPM)作为新型光电探测器，相比传统光电倍增管(PMT)具有体积小、功耗低、抗震动

等优势，符合仪器小型化发展趋势。

2) 综合训练价值

该任务涉及探测器原理、信号处理、电源管理、机械结构等多个技术环节，能够全面训练学生的系统设计能力、

3) 实践可行性

任务复杂度适中，在课程周期内可通过小组协作完成。

4) 任务要求

各小组需要完成从探测器选型、信号处理电路设计、系统标定到性能测试的全过程，最终交付一台具备基本测量功能的便携式 γ 剂量率仪样机，并满足以下技术指标：

- ① 测量范围：0.1 $\mu\text{Sv/h}$ ~10 mSv/h ；
- ② 能量响应：50 keV ~3 MeV ；
- ③ 相对误差： $\leq \pm 15\%$ ；
- ④ 连续工作时间： ≥ 8 小时。

3.2. 分阶段实施过程与指导策略

第一阶段：需求分析与方案论证(第 1~2 周)

在此阶段，各小组首先进行深入的文献调研，重点分析 SiPM 的工作特性、闪烁体选型原则以及剂量率仪的设计要点。例如，第三小组在方案论证过程中，对比了 NaI(Tl)和 LaBr₃(Ce)两种闪烁体的性能特点，最终选择 NaI(Tl)作为探测元件，因其具有成本适中、性能稳定的优势。

教师的指导重点在于引导学生建立系统设计思维，通过组织“设计方案评审会”，邀请领域专家参与评议，帮助学生完善方案细节。有个别小组最初的设计方案中未充分考虑温度补偿问题，在评审过程中经过讨论，增加了温度补偿电路模块，显著提升了方案的可行性。

第二阶段：核心电路设计与仿真(第 3~4 周)

本阶段各小组需要完成关键电路模块的设计，包括：

- 1) SiPM 偏置电路：设计稳定的高压偏置电源($\sim 30\text{ V}$)及保护电路；
- 2) 前级放大电路：基于运算放大器设计低噪声电荷灵敏前放；
- 3) 信号处理电路：包括主放大器、甄别器和脉冲整形电路；
- 4) 单片机系统：完成脉冲计数、剂量计算和显示功能。

第一小组在电路仿真阶段发现初始设计的前放电路噪声较大，通过多次迭代优化，采用 JFET 输入级运放并优化 PCB 布局，最终将等效输入噪声降低至 0.5 fC 以下。这个过程使学生深刻体会到理论设计与工程实践之间的差异。

第三阶段：系统集成与调试(第 5~8 周)

本阶段是整个项目实施的关键，各小组将完成：

- 1) 电路制作与模块连接；
- 2) 固件程序编写与调试；
- 3) 机械结构设计与加工；
- 4) 系统联调与性能优化。

第三小组在系统调试过程中遇到了严重的电磁干扰问题，导致测量结果不稳定。通过教师的引导，学生系统地学习了电磁兼容设计原则，通过增加屏蔽措施、优化接地策略，最终解决了干扰问题。这个过程中，学生不仅掌握了具体的调试技能，更重要的是培养了解决复杂工程问题的能力。支架式教学在

此阶段发挥了关键作用,教师根据学生的实际困难提供针对性指导,随着学生能力的提升逐步撤去支持,最终使学生能够独立解决问题[8]。

第四阶段:性能测试与成果总结(第9~10周)

各小组按照预定的测试方案,使用标准放射源(^{137}Cs 、 ^{60}Co)对仪器性能进行系统测试,包括:

- 1) 能量线性测试;
- 2) 剂量率响应测试;
- 3) 温度稳定性测试;
- 4) 长期稳定性测试。

测试结果显示,所有小组均完成了基本功能实现,其中表现优秀的小组制作的样机达到了以下指标:

- 1) 能量响应范围: 60 keV~2.8 MeV (部分采用仿真计算验证);
- 2) 在 1 $\mu\text{Sv/h}$ 测量点的相对误差为 $\pm 12\%$;
- 3) 温度稳定性为 $-0.3\%/^{\circ}\text{C}$ ($0\sim 40^{\circ}\text{C}$)。

在最终的成果展示环节,各小组不仅提交了完整的仪器样机和技术文档,还通过学术海报和现场演示的形式展示了设计成果,获得了评审专家的高度评价。

通过这一完整的工程实践过程,学生不仅深化了对辐射测量原理的理解,更重要的是掌握了仪器开发的完整流程,培养了面对实际工程问题的解决能力和创新思维。实施过程中出现的各种技术挑战,都成为了学生能力提升的重要契机,充分体现了研究性教学在工程人才培养中的独特价值。

4. 教学改革效果的实证评估

为科学评估研究性教学改革在提升研究生工程实践能力与创新素养方面的成效,本研究采用了混合研究方法,通过多维度的数据收集与分析,对改革效果进行系统验证。

4.1. 评估方法与数据来源

本研究构建了包含量化评估与质性分析的综合评估体系:

成果质量评估:制定《辐射测量仪器设计质量评价量表》,包含创新性(30%)、技术可行性(30%)、系统完整性(25%)和文档规范性(15%)四个维度,由3位行业专家进行盲评。

能力提升测评:采用前后测对比方法,使用自主开发的《工程实践能力自评量表》测量学生在仪器设计、系统集成、问题解决等方面的能力变化。

教学过程分析:收集各小组的设计文档、实验记录、迭代报告等过程性资料,分析学生的工程思维发展轨迹。

学生深度访谈:对12名学生进行半结构化访谈,深入了解学生在项目中的收获与挑战。

4.2. 实施效果分析

4.2.1. 项目成果质量显著

专家评估结果显示,参与课程的所有3个学生小组均成功完成了辐射测量仪器的原型开发,其设计成果均达到了良好以上的质量水平。在技术可行性方面,各小组的设计方案均展现出将理论知识转化为可行工程方案的扎实能力;在系统完整性方面,所有小组都实现了仪器系统的完整集成,体现了较强的系统工程实践能力。特别值得关注的是,在创新性方面,有两个小组表现突出,分别在探测器结构创新和信号处理算法优化方面提出了具有独创性的解决方案,获得了评审专家的特别认可。这些成果表明,以仪器设计与实现为载体的研究性教学模式有效促进了学生工程实践能力的全面提升。

4.2.2. 工程实践能力全面提升

通过对比学生在课程学习前后的表现,可以清晰地观察到其在工程实践能力方面的显著进步。在仪器设计能力方面,学生从最初的概念构思到最终的系统实现,展现了更加系统和专业的设计思维。在系统调试与问题解决方面,面对实际开发过程中遇到的技术挑战,学生表现出更强的分析能力和解决问题的实效性。在工程文档撰写方面,学生完成的方案设计和测试报告在规范性和专业性上均有明显提升。

过程性资料的分析进一步印证了学生工程思维的发展轨迹。在项目推进初期,学生的关注点主要集中在理论计算的完善性上;随着项目的深入,学生的思考维度逐步拓展,开始更多地着眼于系统整体优化、性能提升和可靠性设计等工程实践的核心要素。这一转变过程充分体现了学生从理论认知到工程实践的顺利过渡,以及工程思维能力的实质性成长。

4.2.3. 学习体验深刻积极

问卷调查的反馈结果表明,绝大多数学生通过本项目获得了深刻而积极的学习体验。学生们普遍认为,通过完整的仪器设计实践,他们对工程设计流程建立了系统性的理解;在解决实际工程问题的过程中,工程实践能力获得了实质性的成长;同时,在团队协作完成项目的过程中,沟通协调能力也得到了有效锻炼。

深度访谈进一步揭示了学生的成长轨迹。一位学生的感言颇具代表性:“过去学习电路设计往往停留在公式套用层面,而通过这次完整的项目实践,我才真正理解了每个元件参数背后的工程意义。特别是在调试过程中遇到的每一个故障,都促使我将理论知识与工程实际建立起了深刻联系。”这番体会反映了学生在项目学习中的普遍心声,展现了理论深度与实践广度相融合带来的教学效果。

4.3. 教学效果的深层解析

通过对实证数据的综合分析,本次改革在以下方面取得了显著成效:

1) 知识建构的深化

项目驱动的方式促使学生将分散的理论知识整合为系统的解决方案,实现了从“知道是什么”到“明白为什么”再到“掌握怎么做”的认知跃迁。

2) 工程思维的培养

完整的“设计-实现-测试”流程使学生经历了真实的工程实践,培养了系统思维、权衡决策和迭代优化的能力。

3) 创新自信的建立

面对挑战并最终完成仪器设计的成功体验,极大地增强了学生从事工程技术创新的信心和兴趣。一位学生在访谈中表示:“当看到自己设计的仪器成功检测到辐射信号时,那种成就感无法言喻。这让我相信,只要有系统的学习方法和坚持不懈的努力,我也能解决复杂的工程问题。”这种创新自信的建立,对于研究生未来的工程职业生涯具有深远影响。

从教育理论视角分析,学生在项目中的成长轨迹符合建构主义学习理论的核心观点:知识是在解决真实问题的过程中主动建构的[4]。同时,教师采用的支架式教学策略有效降低了学生的认知负荷,使其能够专注于核心概念的理解与工程思维的培养[3][8]。

值得注意的是,不同基础水平的学生在项目中都获得了显著成长。基础较好的学生展现了更强的创新能力,在方案设计上表现出更多独到见解;而基础相对薄弱的学生通过努力完成系统实现,同样在工程实践能力上获得大幅提升。这种差异化的发展路径,体现了研究性教学在因材施教方面的独特优势。

实证评估结果表明,以仪器设计与实现为载体的研究性教学模式,有效促进了研究生工程实践能力和创新素养的全面发展,为培养高素质工程技术人才提供了可靠路径。

5. 结论与展望

本研究通过《辐射测量与仪器》课程中实施的“仪器设计与实现”研究性教学改革，系统探索了工程类研究生创新能力培养的有效路径。经过一学期的实践验证与系统评估，我们得出以下结论，并对未来发展提出展望。

5.1. 研究结论

基于“设计-实现”的研究性教学模式有效促进了理论与实践之间的深度融合。本教学改革通过引导学生完整参与仪器开发的全过程，成功地将抽象的辐射测量原理转化为具体的工程实践。实证研究表明，学生在仪器设计、系统集成及问题解决等关键能力方面均展现出显著进步。学生普遍反馈，通过项目实践对仪器设计的系统性流程建立了深刻理解。这种“做中学”的教学模式实现了从知识传授向能力培养的有效转变，充分验证了实践驱动型教学在工程教育中的价值。

系统化的教学设计是本次改革取得成效的重要保障。通过构建涵盖需求分析、方案设计、系统实现与性能测试的完整教学流程，并辅以科学的过程性评价体系，为学生的工程能力发展提供了有力支撑。专家评审结果证实，所有学生小组的设计成果均达到良好以上水平，其中多个小组展现出优秀的工程实践能力。这表明本教学设计能够有效指导学生完成从理论认知到工程实践的转化，实现了预期的教学目标。

5.2. 实践反思

在取得显著成效的同时，我们也发现了一些值得深入探讨的问题：

个体差异与因材施教的平衡：由于学生的基础知识和工程经验存在差异，在相同的项目周期内，各组完成度和创新性表现不一。如何在保证基本要求的前提下，为不同基础的学生提供更具针对性的指导，是需要进一步探索的方向。

资源保障与教学效率的优化：仪器开发涉及多学科知识，对指导教师团队提出了更高要求。同时，实验室设备、元器件采购等环节也会影响项目进度。建立更加完善的项目资源库和跨学科指导团队，是提升教学效率的重要保障。

5.3. 未来展望

基于本次改革的经验，我们提出以下发展思路：

1) 课程体系的纵向延伸

计划将本课程的成功经验辐射到相关课程群，构建“基础理论-课程设计-综合实践”的阶梯式培养体系，形成能力培养的连续体。

2) 产学研结合的深化

未来将积极引入企业实际需求作为设计课题，邀请行业专家参与指导，使学生的设计成果更具工程实用价值，同时拓宽学生的工程视野。

3) 数字化教学资源建设

计划建立包含典型设计方案、常见问题解决方案、标准化测试流程的在线资源库，为学生提供更加系统的学习支持。

4) 评价体系的持续完善

将进一步优化过程性评价指标，建立更加精准的能力发展评估模型，实现对创新能力和工程素养的科学测评。

本研究证实了以仪器设计与实现为载体的研究性教学模式在培养研究生工程创新能力方面的有效性。

这种以学生为中心、以项目为驱动、以能力培养为导向的教学理念，不仅适用于辐射测量领域，也为其他工程类课程的教学改革提供了可借鉴的范式。未来，我们将继续深化教学改革，为培养具有创新精神和实践能力的高层次工程人才贡献力量。

参考文献

- [1] 李英, 李雪. 工科研究生教育现存问题及解决方法[J]. 理工高教研究, 2005(4): 39-40.
- [2] 赵文平, 吴敏, 王安民. 面向创新能力的研究生课程体系研究[J]. 学位与研究生教育, 2004(11): 7-10.
- [3] Sweller, J. (1994) Cognitive Load Theory, Learning Difficulty, and Instructional Design. *Learning and Instruction*, **4**, 295-312. [https://doi.org/10.1016/0959-4752\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0959-4752(94)90003-5)
- [4] Jonassen, D.H. (2000) Toward a Design Theory of Problem Solving. *Educational Technology Research and Development*, **48**, 63-85. <https://doi.org/10.1007/bf02300500>
- [5] 郑姝霞, 李欧. 基于研究性学习的实践教学方法探索[J]. 教育文化论坛, 2016(3): 71-75.
- [6] 施晓秋. 遵循专业认证 OBE 理念的课程教学设计与实施[J]. 高等工程教育研究, 2018(5): 154-160.
- [7] 郝昕, 颜强. 项目学习法在高等学校理工科课程翻转课堂教学中的应用探析——以“核辐射探测学”教学为例[J]. 喀什大学学报, 2022, 43(6): 113-116.
- [8] Wood, D., Bruner, J.S. and Ross, G. (1976) The Role of Tutoring in Problem Solving. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, **17**, 89-100.