

核辐射测量综合设计实验设计

夏文明, 龚军军, 陈君军, 杜志辉*

海军工程大学核科学技术学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2021年10月23日; 录用日期: 2021年11月18日; 发布日期: 2021年11月25日

摘要

针对传统核辐射测量实验通常采用NIM插件式核仪器实验系统, 学生只需要对不同的NIM插件进行电缆连接和简单的按键操作, 不利于学生掌握最新的数字化核辐射测量技术, 也不利于对学生工程实践创新能力的培养的问题, 采用项目式教学理念设计了包括GM计数管脉冲计数型核辐射测量系统设计和CZT半导体探测器脉冲幅度分析系统设计等两个项目的核辐射测量综合设计实验, 给出了教学活动设计建议。在完成综合设计实验的过程中, 在巩固学生核辐射测量基本知识和技术的基础上可进一步锻炼初步的科学研究能力, 培养学生的创新意识和思维。

关键词

核辐射测量, 综合设计, 实验设计, 脉冲计数, 脉冲幅度分析

Design on Comprehensive Design Experiments of Nuclear Radiation Measurement

Wenming Xia, Junjun Gong, Junjun Chen, Zhihui Du*

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

Received: Oct. 23rd, 2021; accepted: Nov. 18th, 2021; published: Nov. 25th, 2021

Abstract

In view of the problems traditional experiments of nuclear radiation measurement that using NIM modules nuclear instruments experiments system, students only need to connect different NIM

*通讯作者。

modules with cables and do some easy keystroke actions, it's not beneficial for students mastering the latest technologies of digital nuclear radiation measurement and cultivating the engineering practice innovation ability. Adopting the concept of project-based teaching, the comprehensive design experiments with two projects were designed, which were the design of pulse counting nuclear radiation measurement system for GM count tube and the design of pulse amplitude analyzing nuclear radiation measurement system for CZT semiconductor detectors. The design suggestion of teaching activities is given. In the process of completing the comprehensive design experiments, on the basis of consolidating the basic knowledge and technology of nuclear radiation measurement, the initial scientific research ability of students was exercised further, and the innovative consciousness and thinking of students could be cultivated.

Keywords

Nuclear Radiation Measurement, Comprehensive Design, Experiment Design, Pulse Counting, Pulse Amplitude Analyzing

Copyright © 2021 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

核辐射测量是核工程与核技术、辐射防护与核安全等专业的重要教学内容之一。传统的核辐射测量实验通常采用核仪器标准(NIM)插件系统,将不同功能的核辐射测量模块制作成标准化的 NIM 插件[1],不同的 NIM 插件可自由组合插入标准的 NIM 机箱中形成不同功能的核辐射测量仪器,学生实验时只需根据实验目的选择不同的 NIM 插件进行组合,并完成它们之间的电缆连接再进行简单的按键操作,实验内容和操作相对较简单,对于学生理解深层的核辐射测量原理存在一定的局限性,不利于对学生工程实践创新能力的培养。为培养综合型、创新型新工科人才,本科课程内容更加具有高阶性、创新性和挑战度,将核辐射测量工程实际中涉及到的辐射探测器信号处理、核脉冲信号计数、核脉冲信号幅度分析等内容设计成不同的综合设计项目,采用项目式教学方式,让学生以核辐射测量仪器设计项目为学习研究对象,通过参与项目的设计、开发、研究的全过程,学会应用已有的知识,选择有效的方法和技术,拿出解决项目任务的方案,进行方案评价与比较。

2. 实验项目设置

核辐射测量技术起源自 19 世纪 50 年代,19 世纪 60 年代起开始形成标准化的核辐射仪器插件,有了统一的机箱和插件的机械尺寸[1]。核辐射测量仪器的标准化使不同国家和厂商制造的核辐射监测仪器插件可以相互替代和组合,对于核辐射测量技术的发展具有一定的积极作用,但是随着计算机技术、电子技术和核辐射测量技术的发展,对于核辐射测量仪器的智能化和小型化的要求越来越高[2],市面上的核辐射测量仪器绝大多数都是基于定制化的电子线路设计的,因此,采用 NIM 插件组成学生的核辐射测量实验系统已经不能满足实际的核辐射测量工程需要。基于此考虑,在对核辐射测量实验课程进行教学改革的过程中,设置了 40 学时的综合设计类实验,通过对核辐射测量工程技术现状进行分析,目前核辐射测量领域涉及的工程技术主要包括脉冲计数型和脉冲幅度分析型核辐射测量仪器[3],针对这一特点,选择两种有代表性的核辐射探测器设置综合设计实验项目如表 1 所示。

Table 1. Comprehensive design project settings for nuclear radiation measurement
表 1. 核辐射测量综合设计项目设置

项目名称	课时安排
GM 计数管脉冲计数型核辐射测量系统设计	16
硅半导体探测器脉冲幅度分析系统设计	24

3. 实验设计

针对上述实验项目设置进行了各实验项目的详细实验设计，包括每个项目的任务要求、建议方案和成果测试等内容。项目任务要求对每个项目所要完成的任务内容给出具体的要求。在进行项目设置时考虑的课时分配给学生提出相应的建议方案，减小综合设计的发散度。项目成果测试中对每个项目完成后的报告中应包括的测试内容进行了规定。

3.1. GM 计数管脉冲计数型核辐射测量系统设计

3.1.1. 项目任务要求

在核辐射测量工程实际中，最常见的脉冲计数型核辐射探测器为 GM 计数管。本项目要求学生运用所学的核辐射测量知识设计一套如图 1 所示包含 GM 计数管缓冲电路、幅度调整电路、幅度甄别电路和脉冲计数电路的脉冲计数型核辐射测量系统，并制作和调试出相关的信号处理电路板，要求系统能够正常工作，具备计数结果液晶显示、超阈报警和参数设置功能。

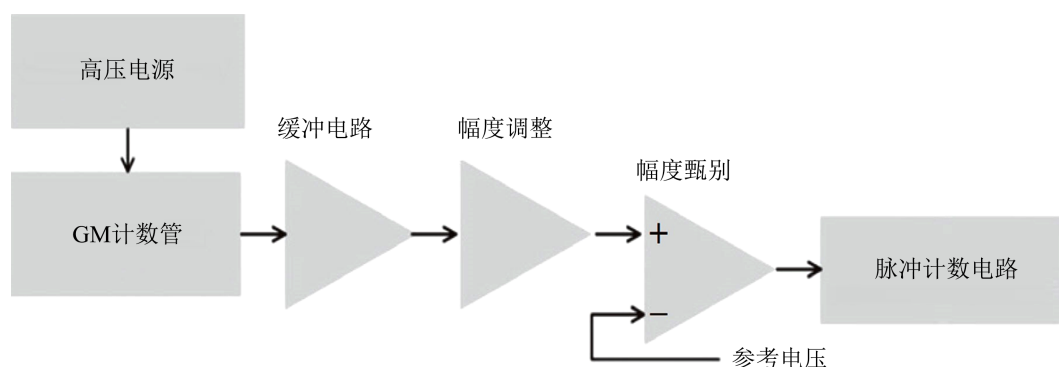


Figure 1. The schematic of GM count tube pulse count type nuclear radiation measurement system
图 1. GM 计数管脉冲计数型核辐射测量系统原理框图

3.1.2. 项目建议方案

1) 缓冲电路

GM 计数管加上直流高压偏置后，输出信号幅度较大，且与入射粒子能量无关[4]，需要经过缓冲电路处理后才能满足后续电路要求。GM 计数管的缓冲电路一般为图 2 所示四种电路中的一种。其中图 2(a)、图 2(c)两种接法，都是输出负脉冲。图 2(a)需用到正高压电源，高压负端接地，计数管阴极接地，但耦合电容 C 要耐高压。图 2(c)的接法高压正端接地，因此要用到负高压电源，耦合电容 C 两端电位差别不大，可以不用耐高压的电容。GM 计数管串接的电阻 R 数值不宜过小，卤素计数管 R 为 5 MΩ~15 MΩ，有机计数管 R 也应大于 1 MΩ~2 MΩ，以保证 GM 计数管的正常工作，R 过小，GM 计数管放电将过于强烈，使其寿命缩短，坪曲线将变坏[1]。

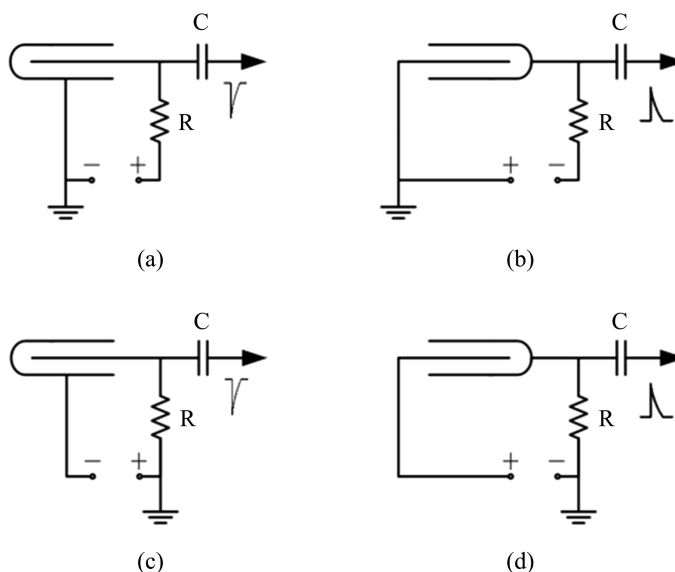


Figure 2. Four buffer circuits for GM counting tubes
图 2. GM 计数管的四种缓冲电路

2) 幅度调整电路

不同的 GM 计数管的信号经过缓冲电路后的幅度不一定能满足后续电路的要求，为了使信号处理电路满足不同 GM 计数管的要求，需要在缓冲电路后使用脉冲幅度调整电路来调整脉冲信号的幅度，通常可采用同相放大电路或反相放大电路来进行幅度调整，具体选择何种电路由学生根据自己选择的缓冲电路和后续的电路设计来选择和设计。

3) 脉冲幅度甄别电路

由于本项目任务要求中明确要求输出信号为+5 V TTL 脉冲信号，因此在幅度调整电路后面还需要加上脉冲幅度甄别电路。它有一个可变的参考电压，也称为甄别阈。输入脉冲幅度大于给定的甄别阈时，输出一个脉冲，输入脉冲幅度小于给定的甄别阈时则无脉冲输出。理想的脉冲幅度甄别电路输出脉冲应与输入脉冲的幅度、上升时间、宽度等参数无关[5]。

4) 脉冲计数电路

本项目给学生提供 Arduino UNO 开发板作为脉冲计数电路的硬件，提供 LCD1602 型液晶模块作为结果显示模块，提供 2 个轻触开关作为控制按键，提供 1 个蜂鸣器作为超阈报警器件，学生按照图 3 所示原理图制作脉冲计数电路。

学生在完成上述电路的制作之后还需要利用 Arduino IDE 程序完成驱动 Arduino UNO 运行的嵌入式程序的编写和调试[6]。如图 3 所示，LCD1602 液晶显示模块采用 4 线式驱动方式，需要 Arduino UNO 开发板的 7 个数字口进行驱动，Arduino UNO 开发板的 D0 和 D1 口定义为数字输入口分别连接一个轻触开关作为仪器控制按键，D3 口定义为数字输出口驱动蜂鸣器，当脉冲计数率大于设定的报警阈值时发出报警响声。

3.1.3. 项目成果测试

学生在完成系统的电路设计制作和程序调试之后，应该完成对系统的测试试验，首先应该对模拟电路部分每一级的输出信号进行测试和记录。对整个系统进行测试时，应该对系统的计数率线性性能、最高计数率上限和读数建立时间等性能进行测试。

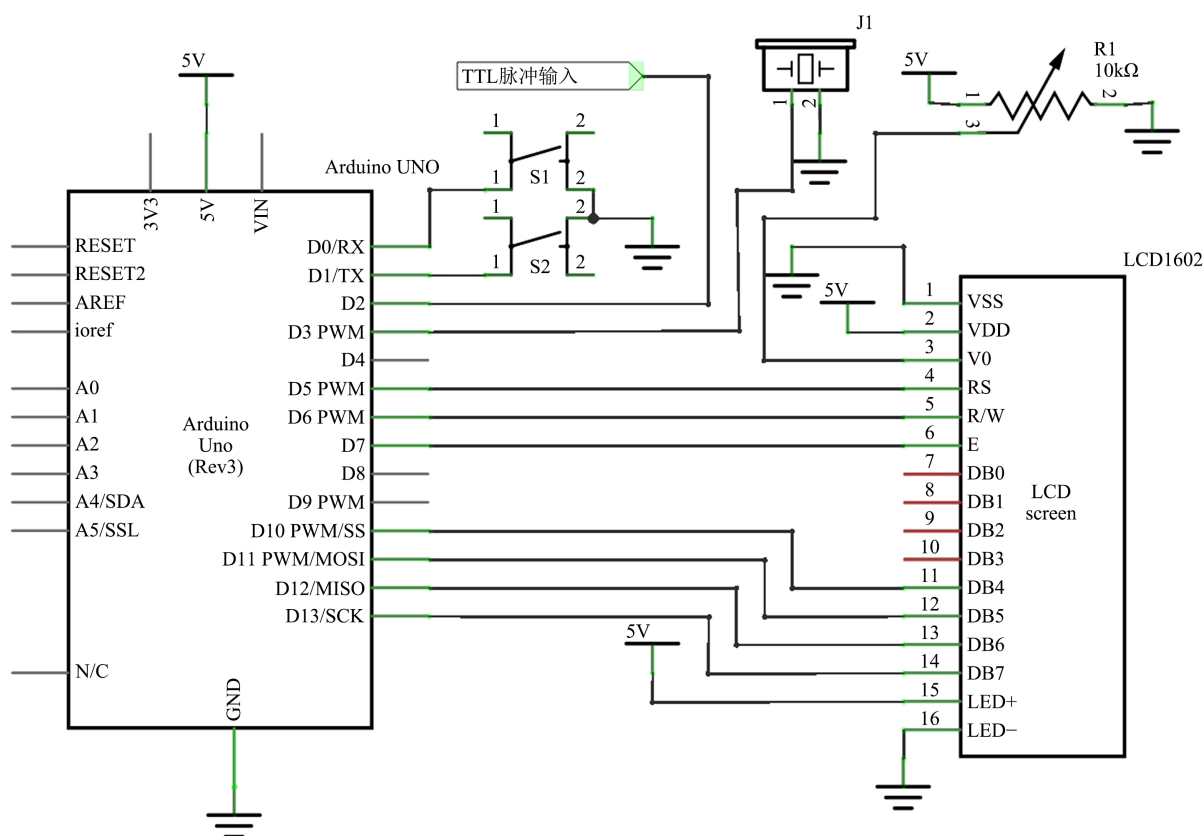


Figure 3. Pulse counting circuit based on the Arduino board

图 3. 基于 Arduino 开发板的脉冲计数电路

3.2. CZT 半导体探测器多道脉冲幅度分析系统设计

3.2.1. 项目任务要求

在核辐射测量工程实际中，除脉冲计数型核辐射测量仪器外，脉冲幅度分析型核辐射测量仪器占有最大的比重，大多是测量射线或粒子能谱相关的仪器。用于脉冲幅度测量的核辐射探测器的种类较多，常见的包括正比计数管、脉冲电离室、半导体探测和闪烁体探测，除闪烁体探测以外，其它脉冲幅度分析型核辐射探测器的信号处理电路均类似，主要包括电荷灵敏前置放大器和滤波成型电路[7]，输出信号再经多道脉冲幅度分析系统进行幅度分析和结果显示。进行脉冲幅度分析的电路则分为两大类，分别是模拟多道分析系统和数字多道分析系统，目前核辐射测量实际当中较为流行的是数字化多道，即将脉冲信号数字化之后进行数字化信号处理得到脉冲幅度信息[8]。碲锌镉(以下简称：CZT)半导体探测器体积小且能在常温下工作，因此设置了基于 CZT 半导体探测信号处理电路设计项目。要求学生通过学习和项目实施，设计一套包含电荷灵敏前置放大器和滤波成型电路的 CZT 半导体探测器信号处理电路，并利用 USB 接口的高速数据采集卡和 LabVIEW 虚拟仪器软件开发一套数字化多道分析系统软硬件，如图 4 所示。要求所设计的系统能够正常工作，模拟信号处理电路输出信号为 0~1 V 的近似高斯脉冲，脉冲宽度不超过 50 μs 。

3.2.2. 项目建议方案

1) 电荷灵敏前置放大器电路

本项目提供的 CZT 半导体探测器是陕西迪泰克新材料有限公司生产的 DT-P02 型 α 能谱探测器。该

探测器由高分辨率 CZT 晶体、高质量可见光屏蔽窗口和金属封装外壳组成，可在室温和可见光照射条件下工作，且可多次清洁擦拭。半导体探测输出信号较小，设计难度较大，给出的电荷灵敏前置放大电路建议方案如图 5 所示，低噪声、高跨导的场效应管作为输入级，第二级采用运算放大器。为了尽量得到较大幅度的输出信号，电荷灵敏前置放采用了较小的 1pF 的反馈电容 C2。

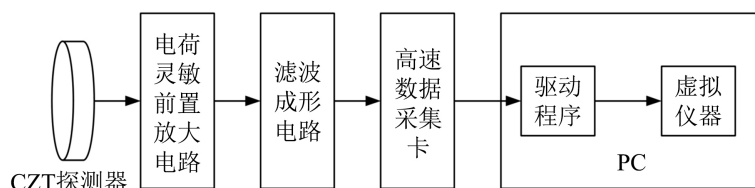


Figure 4. The block diagram of CZT semiconductor detector multi-channel pulse amplitude analysis system

图 4. CZT 半导体探测器多道脉冲幅度分析系统组成框图

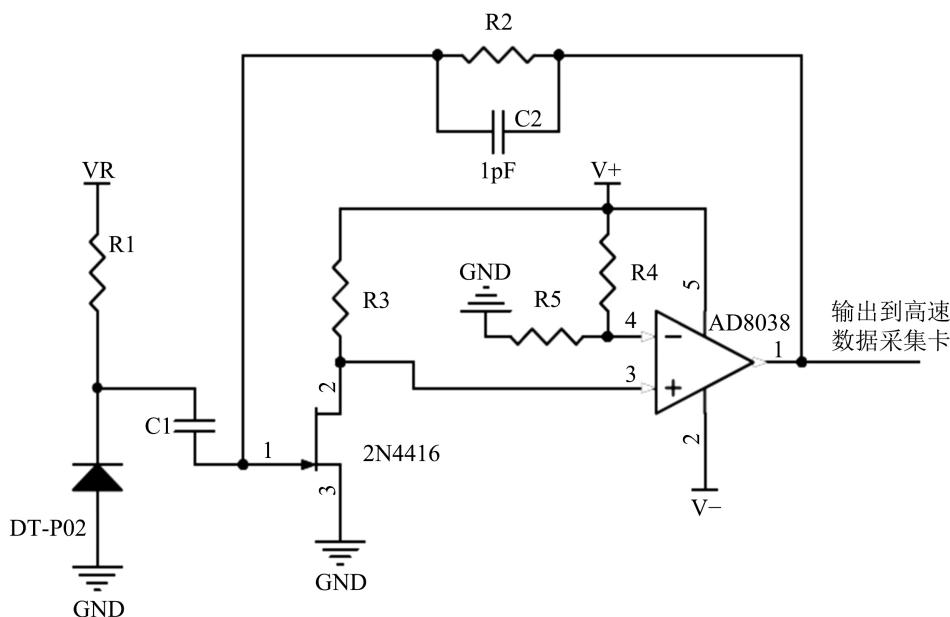


Figure 5. The schematic of charge sensitive preamplifier circuit for CZT semiconductor detector

图 5. CZT 半导体探测器电荷灵敏前置放大器电路原理图

2) 滤波成形电路

电荷灵敏前置放大电路输出的信号信噪比较大，为了提高信噪比，必须在电荷灵敏前置放大器后面加上滤波成形电路，从而对信号中的噪声进行抑制，如图 6 所示为最简单的基于 CR-RC 网络的滤波成形电路，通过它可以缩小放大器的带宽达到抑制噪声的目的[9]，学生可以根据实际信号处理效果调整相关的参数来改变信号的前沿和后沿的形状，从而实现将信号调整到近似高斯脉冲的形状[10]。滤波成形电路的主要任务是抑制系统的噪声并使信号的形状满足后续分析测量的要求，但一般会与放大电路在一起，因此兼具增益调节功能，可将前放输出的信号幅度调整到 0~1 V 范围内，以满足高速数据采集卡的要求。

3) 多道脉冲幅度分析系统

本项目给学生提供 NI 公司的 USB 接口的高速数据采集卡 NI-5133 作为脉冲信号数字化的硬件，它是一个双通道的数采卡，最高采样频率可达 100 MS/s [11]，对于经过滤波成形后的近似高斯脉冲是能够

满足要求的。对于没有计算机编程基础的学生，本项目采用 NI-5133 采集卡也是为了利用 NI 公司的 LabVIEW 虚拟仪器软件，让学生能够在有限的学时里完成能谱数据显示和分析软件的设计[12][13]。

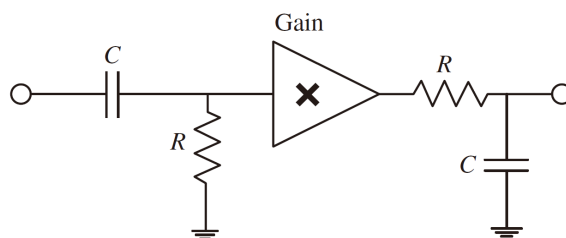


Figure 6. The schematic of filter and shaping circuit

图 6. 滤波成形电路原理图

3.2.3. 项目成果测试

学生在完成 CZT 半导体探测器多道脉冲幅度分析系统的软硬件开发和调试之后，应该完成对系统的测试试验，首先对电路前置放大器和滤波成形电路的输出信号进行测试，测量输出信号的特征，判断是否满足设计任务要求。对于多道脉冲幅度分析系统，主要测试系统的最高计数率上限、能量分辨率和能量线性等指标。

4. 教学活动设计

本综合设计课程采用项目式教学方法，旨在培养学生的综合能力和创新意识，以下给出实际教学活动设计的建议。

4.1. 综合设计项目教学的基本流程

与一般实验课程的流程不一样，项目式综合设计教学的基本流程大致分为引入阶段、实施阶段和总结阶段[14]。引入阶段包括项目的描述、知识准备和任务定位。要充分考虑学员的学习基础，包括核辐射测量理论基础、电子技术基础和计算机基础等，要保证项目任务中所涉及到的非重点的知识和技能应该是学生已经具备的，如果不具备应该简化相关内容或安排学生提前自学。实施阶段需要按照项目具体任务分解成若干个完成步骤，在设计的时候要对学员和教员在每个步骤内应该进行的活动进行设计。总结阶段包括项目成果的展示与评价、项目总结。由充分体现以“学生为中心”的原则，学生是主体，从项目的计划、实施到最后的评价都要让学生真正地参与进来[15]。

4.2. 学员学的活动的设计

1) 引入阶段给学员设计的学的活动应该包括：从整体上理解项目任务和内容，建立该项目在核辐射测量工程实际中的概念；理解项目的学习目标，并根据目标对所涉及到的核辐射测量理论和完成的大致程序进行了解；对项目要求的质量标准要理解清楚，对于分组完成的项目要了解自己的任务分工。2) 实施阶段给学生设计的学的活动包括：对完成项目实践的具体步骤和质量标准进行分析，按照项目任务的要求，通过团队合作，运用仪器、设备和材料并对照各个分步骤的要求一步步完成各项实践。3) 总结阶段给学生设计的学的活动包括：完成项目成果的展示并参与对自己和他人项目成果的评价，积极归纳通过该项目有所提高和应该改进的各个方面。

4.3. 教师教的活动的设计

1) 引入阶段教师教的活动包括讲解项目任务、内容和质量要求，解释项目所涉及的相关基础及通过

项目学习学生应具备的能力。2) 实施阶段教师教的活动包括讲解各步骤的内容和过程, 对学生项目实施的技巧进行指导, 包括如何进行团队合作、如何撰写项目报告、如何排除故障等等, 同时还要对学生在项目实施阶段进行观察、监督和记录, 作为评价的依据, 在每一个步骤完成时可以进行阶段性的讲评, 对学生项目实施过程中的共性问题进行归纳和及时讲评。3) 总结阶段教师教的活动包括: 组织学生进行项目成果的展示和评价, 还要组织学生通过共同讨论的方式对项目完成的情况进行总结, 探讨如何进一步提高教学效果并给出建议。

5. 结论

本文提出了基于项目式教学法的核辐射测量综合教学改革方案, 根据核辐射测量工程实际设计了 GM 计数管脉冲计数型核辐射测量系统设计和硅半导体探测器脉冲幅度分析系统设计两个实验项目, 给出了每个项目的项目任务要求、建议技术方案和项目成果测试等教学内容方面的建议, 探讨了综合设计的教学活动设计。本文所设计的实验不仅可以加深学生对核辐射测量深层原理的理解, 还通过具有一定高阶性、创新性和挑战度项目设计, 加强了学生综合运用所学知识解决实际工程问题的能力, 提高他们的工程实践能力和创新意识, 还可以让学生通过完成综合设计锻炼初步的科研能力, 并通过分组完成任务培养团队合作意识和沟通协调能力。

基金项目

海军工程大学教学成果培育项目——辐射测量课程群项目式教学改革。

参考文献

- [1] 王芝英. 核电子技术原理[M]. 北京: 原子能出版社, 1989.
- [2] 左广霞. 核辐射信号分析基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2014.
- [3] 周建斌, 周伟, 王敏. 核信号数值分析与数字模拟[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2015.
- [4] 汪晓莲, 李澄, 邵明, 等. 粒子探测技术[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [5] Grupen, C. and Shwartz, B.A. (2008) Particle Detectors. 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge.
- [6] 陈吕洲. Arduino 程序设计基础[M]. 第 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
- [7] Spieler, H. (n.d.) Pulse Processing and Analysis. <http://www-physics.lbl.gov/~spieler>
- [8] Gilmore, G.R. (2008) Practical Gamma-Ray Spectrometry. 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken.
- [9] Knoll, G.F. (2000) Radiation Detection and Measurement. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
- [10] Nakhostin, M. (2018) Signal Processing for Radiation Detectors. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
- [11] National Instrument Corp (2019) USB-5133 Specifications. <http://www.ni.com/pdf/manuals/374929c.pdf>
- [12] 张怀强, 张雄杰, 吴和喜, 等. 基于 LabVIEW 的数字核信号处理平台的研发[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(9): 1152-1155.
- [13] 刘昌伟. 基于 USB 接口的 LabVIEW 数据采集与传输系统的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 烟台: 烟台大学, 2009.
- [14] 杨文明. 高职项目教学理论与行动研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [15] 徐国庆. 职业教育项目课程原理与开发[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2016.