

# 高集成度自动化 $\gamma$ 能谱仪

陈琦, 王忠海, 张肇驿, 李佛泉, 杨朝文

(四川大学物理学院辐射物理与技术教育部重点实验室, 成都 610064)

**摘要:** 针对核反应堆安全壳内  $\gamma$  射线在线监测需求, 本文设计了一款高集成度、低功耗、高分辨、长续航、可自动测量的  $\gamma$  能谱仪。谱仪选用了高分辨率  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  闪烁体探测器, 并且设计了有源锥形分压电路为探测器供电, 从而提高谱仪的能量响应动态范围。同时设计了低噪声电荷灵敏前置放大器电路对探测器输出信号进行放大, 并匹配设计二阶有源低通滤波电路, 将前端信号成形为准高斯脉冲信号。采用 STM32L4 系列微处理器设计了高集成度的多道脉冲幅度分析电路, 完成脉冲信号的模数转换和在线数据处理, 获得  $\gamma$  能谱。另外, 本文还基于 CC228P-09Y 小型高压电源模块设计了低噪声高压电源电路为  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  探测器提供高压; 利用 STM32L4 处理器设计了锂电池供电的电源管理电路, 使得谱仪可以实现自动开启工作模式或进入待机模式, 从而实现长续航时间自动  $\gamma$  能谱测量功能。对谱仪进行性能测试得到: 谱仪能量分辨率为 3.0% (@662 keV), 且能量响应积分非线性为 9.5%, 能够长期稳定工作, 具有低功耗长续航时间等特点。

**关键词:**  $\gamma$  能谱仪; 高集成度;  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  探测器; 低功耗

**中图分类号:** TL817+.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2021.044001

## Highly integrated automated $\gamma$ spectrometer

CHEN Qi, WANG Zhong-Hai, ZHANG Zhao-Yi, LI Fo-Quan, YANG Chao-Wen

(Key Laboratory of Radiation Physics and Technology, Ministry of Education, College of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract:** With respect to the need for online  $\gamma$ -ray monitoring in the containment of nuclear reactors, a  $\gamma$  spectrometer with high integration, low power consumption, high energy resolution, long endurance and automatic measurement is designed in this paper. A  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  scintillator detector with high energy resolution is used in the spectrometer. And an active cone-shaped voltage divider circuit is designed to supply power to the detector and to improve the dynamic range of energy response of the spectrometer. Additionally, a low noise charge-sensitive preamplifier circuit is designed to amplify output signal of detector, and a second-order active low-pass filter circuit is designed to shape the front-end signal into a quasi-Gaussian pulse signal. A high integrated multi-channel pulse amplitude analysis circuit is designed by using STM32L4 series microprocessor to complete the analog-to-digital conversion and on-line data processing of the pulse signal and to obtain  $\gamma$  energy spectrum. In addition, we also designed a low-noise high-voltage power supply circuit based on the CC228P-09Y small high-voltage power supply module to provide high voltage for the  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  detector. The power management circuit powered by lithium bat-

收稿日期: 2020-11-01

基金项目: 四川省科技计划(2018GZ0524)

作者简介: 陈琦(1996-), 男, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 主要研究领域为核电子学. E-mail: 1748080292@qq.com

通讯作者: 王忠海. E-mail: zhonghaiwang@scu.edu.cn

tery is designed by using STM32L4 series processor, thus the spectrometer can enter the working mode or standby mode automatically, realizing the automatic  $\gamma$  spectrum measurement function of long endurance time. In the end, a detailed performance test of the spectrometer is carried out: the energy resolution of the spectrometer is 3.0% (@ 662 keV), and the energy response integral nonlinearity is 9.5%. It can work stably for a long time and has the characteristics of low power consumption and long endurance time.

**Keywords:**  $\gamma$  spectrometer; Highly integrated;  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  detector; Low power consumption

## 1 引言

$\gamma$  能谱仪是辐射探测相关的重要仪器设备。它被广泛应用于辐射环境监测、卫生防疫、地质普查、放射医疗等领域<sup>[1]</sup>。传统的  $\gamma$  能谱仪一般采用探测器外接成型电路、数据采集电路和供电电源的系统结构,存在体积大、重量大、携带不方便和抗干扰能力差等缺点。随着我国核电事业快速发展,截至 2019 年 12 月,中国大陆共有 16 座核电站 47 台机组投入商业运行,并有 13 座核电站正在建设当中<sup>[2]</sup>。考虑到反应堆内部的空间狭小、电磁环境复杂且不方便供电和人员进出,为了探测反应堆运行时产生的  $\gamma$  射线,要求  $\gamma$  能谱探测设备具有体积小、可长期无人值守、自动测量的特点。针对以上需求,本文研制了基于 STM32L4 系列微处理器的高集成度、高分辨率、高稳定性、低功耗和智能化  $\gamma$  能谱仪。

## 2 系统设计

$\gamma$  能谱仪的总体设计方案如图 1 所示。谱仪采用闪烁体探测器探测  $\gamma$  射线,通过设计小尺寸高压电路为闪烁体探测器供电;采用电荷灵敏前置放大器电路对探测器输出信号进行读出和放大;采用集成运算放大器芯片设计了两级二阶有源低通滤波电路,对前置放大电路输出信号进行滤波、成形

列的 ARM 处理器设计了高集成度多道分析电路,并结合嵌入式程序实现了探测器信号能谱处理和系统控制;同时  $\gamma$  能谱仪还设计了专用的锂电池电源管理电路,以实现  $\gamma$  能谱仪的低功耗和长续航功能。

### 2.1 探测器选型

目前  $\gamma$  能谱仪中常用的探测器主要包括半导体探测器和闪烁体探测器。其中半导体探测器能量分辨率较好,比如高纯锗探测器的能量分辨率约为 0.2% @ 662 keV。但是半导体探测器通常需要液氮制冷或者电制冷保证探测器正常工作,使得这类  $\gamma$  能谱仪体积大,不方便携带,同时功耗高,一般只作为固定式  $\gamma$  能谱仪放置在实验室里面使用<sup>[3]</sup>。另外闪烁体探测器体积小、成本低,普遍用于便携式的  $\gamma$  能谱仪,但其能量分辨率相对较差,比如  $\text{NaI}(\text{TI})$  闪烁体探测器约为 7.0% @ 662 keV。因此这类  $\gamma$  能谱仪对于能量分辨率要求高的应用环境还存在一定的不足。本次研究通过调研选择了高能量分辨率  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  闪烁体探测器(3.0% @ 662 keV),其与  $\text{NaI}(\text{TI})$  闪烁体探测器的性能对比<sup>[4-5]</sup>如表 1 所示。由表 1 可知  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  闪烁体探测器具有能量分辨率高、能量线性好、探测效率高、光产额高等优点,其缺点在于存在一定的放射性本底和价格较高等。

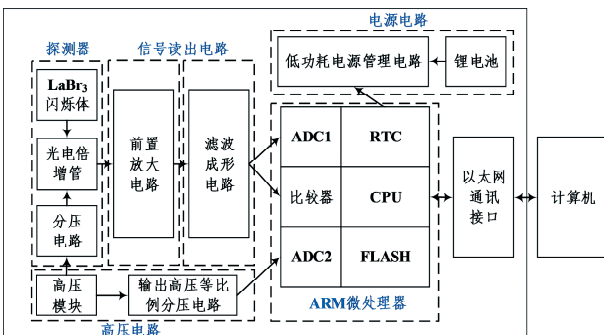


图 1  $\gamma$  能谱仪系统组成框图

Fig. 1 A block diagram of the  $\gamma$  spectrometer system

和放大; $\gamma$  能谱仪采用低功耗高性能 STM32L4 系

表 1  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  探测器与  $\text{NaI}(\text{TI})$  闪烁体探测器的主要性能对比<sup>[4-5]</sup>

Tab. 1 The main performance comparison of  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  detector and  $\text{NaI}(\text{TI})$  scintillator detector<sup>[4-5]</sup>

参数	能量分辨率/@ 662 keV	密度/( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	光产额/(光子/keV)	衰减时间/ns	能量线性	放射性本底
$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$	3.0%	5.08	63	16	稍好	有
$\text{NaI}(\text{TI})$	7.0%	3.67	38	250	稍差	无

### 2.2 信号读出电路设计

信号读出电路主要分为 PMT 分压电路、前置放大电路和滤波成形电路。PMT 分压电路一般可

以分为无源分压电路和有源分压电路. 无源分压电路的结构简单, 但对于宽能量范围的  $\gamma$  射线探测往往存在非线性效应和信号失真问题. 而有源式分压电路会在后几级打拿极间添加三极管组成电压跟随器, 通过稳定极间电压来优化非线性问题<sup>[6]</sup>. 本谱仪设计采用有源分压电路方案如图 2 所示, 同时设计了锥形分压电阻比例, 不仅提高了 PMT 前端的电子收集效率, 而且进一步优化了  $\gamma$  能谱仪的能量线性. PMT 输出电流信号通过耦合电容 C1 (如图 3) 送入前置放大电路转变为电压信号. 为了减少探测器电容变化对输出信号的影响, 达到最佳的信噪比, 谱仪设计了电荷灵敏型的前置放大电路<sup>[7]</sup>. 其中运算放大器型号选取的是 ADI 公司生产的 AD8065, 具有高带宽 (145 MHz), 低噪声 (7 nV/Hz), 低输入偏置电流 (1 pA), 适用于  $\gamma$  能谱测量<sup>[8]</sup>.

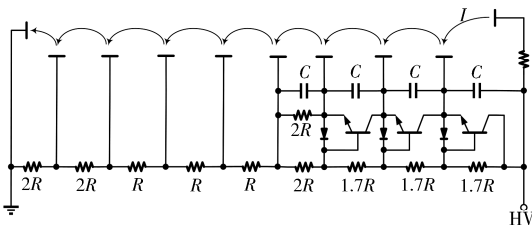


图 2 有源分压电路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of active voltage divider circuit

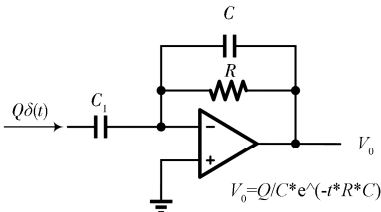


图 3 电荷灵敏前置放大电路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of charge sensitive preamplifier circuit

常用的滤波成形电路可分为有源滤波电路和无源滤波电路. 为了用更少的滤波级数得到准高斯的滤波效果, 并且减少负载变化给滤波电路带来的影响, 本谱仪设计选用了两级基于 S-K 滤波电路的二阶有源低通 Bessel 滤波器 (如图 4). S-K 滤波电路由于采用了部分正反馈具有较高的品质因子, 普遍用于核脉冲的滤波成形<sup>[9]</sup>. Bessel 滤波器具有最佳的瞬态响应, 可以使滤波过后的信号充分满足 ADC 的输入量程范围, 同时减少在高计数率情况下信号尾堆积引起的脉冲幅度变化. 该滤波成形电路设计选用 ADI 公司生产的型号为 ADA4807 的运算放大器, 它具有高压摆率 (225

V/ $\mu$ s) 和低失真度, 适合应用于滤波成形电路.

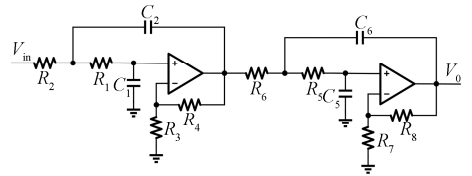


图 4 滤波成形电路原理图

Fig. 4 Schematic diagram of filter shaping circuit

### 2.3 小尺寸高压电路设计

高压电路的作用是通过分压电路给 PMT 各个打拿级提供高压, 驱动 PMT 正常工作. 高压电路在满足输出电压要求的同时往往还需要输出电流够大, 防止 PMT 在高的信号计数率的情况下出现饱和或脉冲幅度失真. 同时为了保证 PMT 各个打拿级间增益的稳定性, 还要求高压电路的工作温度范围宽、温度变化系数低和输出稳定性高. 另外, 较小的输出高压噪声纹波也可以提高输出信号的信噪比, 进而提高谱仪的能量分辨率. 综合以上几点和谱仪集成度的设计要求, 我们选用了滨松公司生产的型号为 CC228P-09Y 的小型高压电源模块<sup>[10]</sup>, 其尺寸为 46 mm $\times$ 25 mm $\times$ 12 mm (如图 5), 具体参数见表 2. 高压模块的输出电压按比例 (400 : 1) 分压后送入高压监测 ADC 进行采集, 确保谱仪探测器工作电压正常.

表 2 CC228P-09Y 高压电源模块主要参数

Tab. 2 The main parameters of CC228P-09Y high voltage power module

输出电 压范围/V	最大输 出电流/mA	输出稳 定性	温度系 数/(%/ $^{\circ}$ C)	工作温 度/ $^{\circ}$ C	最大纹 波/mV
0~1 250	1	0.01%	0.03	-25~70	30

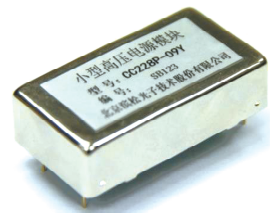


图 5 CC228P-09Y 高压电源模块实物图

Fig. 5 CC228P-09Y high voltage power module

### 2.4 多道脉冲幅度分析电路设计

常见的多道脉冲幅度分析电路主要由峰值保持电路和 ADC 采样电路实现对探测器输出信号脉冲幅度采集, 整体电路结构较为复杂且电路功耗较大. 本谱仪在设计时针对这些问题采用了波形全采样的多道分析电路设计方案. 方案选取了意

法半导体公司主打的超低功耗 ARM 处理器芯片 STM32L4 系列作为控制芯片<sup>[11]</sup>,它是基于 cortex-m4 的内核,最大主频可以到达 80 MHz,待机电流低至 120 nA. 同时它集成 5 Msps、12-bit 高速 ADC 以实现波形全采样. 滤波成形电路的输出信号一方面可以直接送入该 ADC 完成模数转换,另一方面可以输入到 ARM 处理器自带的比较器来指示信号的到达时间(如图 6). CPU 通过比较器得知探测器信号到来后会去缓存区获取 ADC 采样数据,接着对这些数据进行波形平滑、峰值提取和能谱统计等处理,从而实现了多道脉冲幅度分析电路的功能. 最后能谱信息存入 ARM 处理器自带的 FLASH 中,保证谱仪在待机状态下测量数据不会丢失. 同时规定好相关的读取指令,当 ARM 处理器从以太网等通讯接口接收到读取指令时,会自动把已经存储好的测量数据发送给用户.

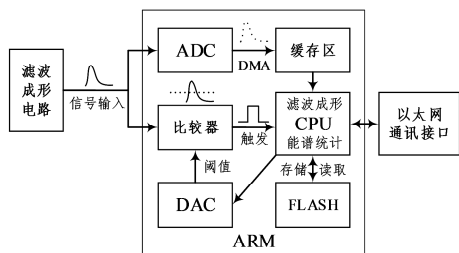


图 6 多道脉冲幅度分析处理框图

Fig. 6 Block diagram of multi-channel pulse amplitude analysis and processing

### 2.5 低功耗电源管理电路设计

为了能够在核反应堆内部进行长期的无外接电源续航工作,谱仪在设计时一方面需要设计基于锂电池的电源供电方案,解决反应堆内部供电不方便的问题;另一方面需要设计 ARM 可编程的电源管理方案,实现谱仪待机功耗的最小化.

谱仪设计了基于锂电池供电的电源方案如图 7 所示. 由于 ARM 主控电路上包含有一块容量为 255 mAh 的纽扣电池单独给集成在 ARM 处理器上的实时时钟(RTC)供电,用户可以提前在嵌入式程序上设定好自动睡眠和定时唤醒的时间表. 当 RTC 上的时间到达唤醒时间点时会自动唤醒 ARM 处理器,并将电源芯片以及电源开关芯片的使能管脚 EN 上拉至高电平,启动谱仪正常工作进入  $\gamma$  能谱工作模式;当 RTC 上的时间到达睡眠时间时提醒 ARM 处理器进入睡眠模式,电源芯片和电源开关芯片使能管脚 EN 恢复至默认的低

电平状态,测量结束,此时谱仪的功耗降到 8.40 mW,从而实现了长期待机和自动定时唤醒并开展  $\gamma$  能谱测量的智能化功能.

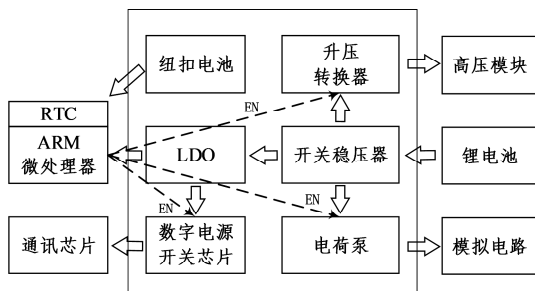


图 7 谱仪电源电路供电方案框图

Fig. 7 Block diagram of power supply circuit of spectrometer

### 3 谱仪搭建

考虑到 PMT 管座整体的尺寸大小和内部可用空间,谱仪采用板-板堆叠的电路板空间布局,板与板之间通过合适长度的六角黄铜柱连接固定起来,并把它们组装在铝制的圆管中,最大程度上增加了空间利用率,减少了整体体积,使谱仪更加紧凑轻便. 实际通过测量得到  $\gamma$  能谱仪的整体尺寸为  $\phi 60 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$ .  $\gamma$  能谱仪背后包含有电源接口、按钮开关和以太网接口,方便用户对  $\gamma$  能谱仪进行外部供电输入、电源开关控制和能谱数据获取,其具体实物图如图 8.



图 8 电路结构: (a) 板-板堆叠实物图, (b)  $\gamma$  能谱仪, (c) 交互式接口

Fig. 8 The circuit structure: (a) board-board stack, (b)  $\gamma$  spectrometer, (c) interactive interface

### 4 实验测试和实验结果

为了对设计的  $\gamma$  能谱仪性能做详细的测试,搭建的实验平台如图 9 所示. 实验选取了  $^{241}\text{Am}$  (59.5 keV)、 $^{57}\text{Co}$  (122 keV)、 $^{133}\text{Ba}$  (356 keV)、 $^{137}\text{Cs}$  (662 keV)、 $^{54}\text{Mn}$  (835 keV)、 $^{232}\text{Th}$  (1 588 和 2 614 keV)、 $^{60}\text{Co}$  (1 173 和 1 332 keV) 作为  $\gamma$  放射源,同时选取了 1 英寸(1 英寸 = 2.54 cm)的 La-Br<sub>3</sub>(Ce) 晶体作为  $\gamma$  能谱仪的探测器晶体. 实验还选用了滨松公司生产的型号为 RS6231-100 的 PMT,并设置 PMT 的供电电压为 940 V. 外部选



用了 12 V、10 Ah 的聚合物锂电池和线性电源作为电源输入,并用室内的空调将室温恒温到 22 °C. 实验分别对谱仪的能量分辨率、能量非线性度、长期稳定性、待机功耗和运行功耗进行测试.

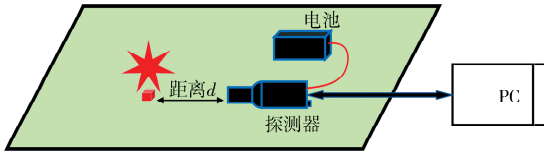


图 9 实验平台搭建示意图

Fig. 9 Schematic diagram of experimental platform construction

### 4.1 能量分辨率测试

能量分辨率是表征谱仪分辨相近能量  $\gamma$  射线的重要指标. 实验时,为了防止信号堆积导致能谱峰位畸变,根据<sup>137</sup>Cs 放射源的活度和  $\gamma$  能谱仪的探测效率,最后确定将<sup>137</sup>Cs 放射源放置距离探测器 10 cm 处,此时能谱仪的计数率约为 400 cps. 同时设置  $\gamma$  能谱仪的单次测量时间为 20 min,重复测量 10 次,测得<sup>137</sup>Cs 放射源的能谱如图 10 所示. 实验通过用<sup>241</sup>Am 放射源(59.5 keV)和<sup>60</sup>Co 放射源(1 173 和 1 332 keV)对谱仪进行能量刻度,计算得 662 keV 的能量分辨率为 3.0%.

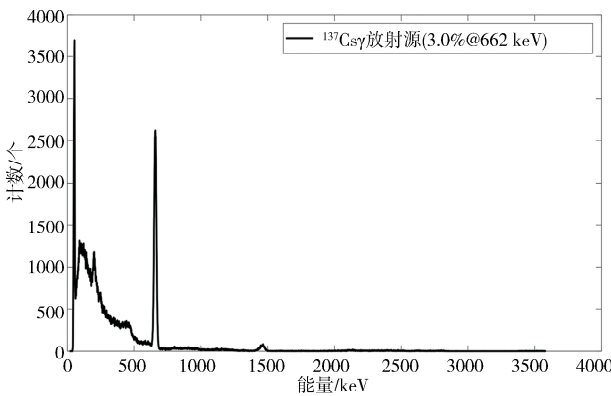


图 10 实测<sup>137</sup>Cs  $\gamma$  放射源能谱图

Fig. 10 The measured energy spectra of <sup>137</sup>Cs  $\gamma$  radiation sources

### 4.2 能量非线性测试

谱仪对射线能量响应线性度越高,表示谱仪对射线能量的测量精度越高. 为了准确地对谱仪的能量线性响应进行测试,实验选用多种  $\gamma$  放射源进行测试:<sup>241</sup>Am(59.5 keV)、<sup>57</sup>Co(122 keV)、<sup>133</sup>Ba(356 keV)、<sup>137</sup>Cs(662 keV)、<sup>54</sup>Mn(835 keV)、<sup>60</sup>Co(1 173 和 1 332 keV)和<sup>232</sup>Th(1 588 keV 和 2 614 keV). 测量得到的峰位道址-能量对应关系见表 3,根据测量结果作出能量响应线性拟合曲线见图

11,可以看到谱仪在 50~3 000 keV 探测能区内具有良好的线性,其最大相对偏差为 9.5%.

表 3 测试放射源  $\gamma$  射线能量和峰位道址

Tab. 3 The  $\gamma$ -ray energies and peak positions of the tested radioactive source

放射源	道址	能量/keV
<sup>241</sup> Am	54	59.5
<sup>57</sup> Co	137	122
<sup>133</sup> Ba	395	356
<sup>137</sup> Cs	738	662
<sup>54</sup> Mn	932	835
<sup>60</sup> Co	1 325	1 173
<sup>60</sup> Co	1 510	1 332
<sup>232</sup> Th	1 832	1 588
<sup>232</sup> Th	3 007	2 614

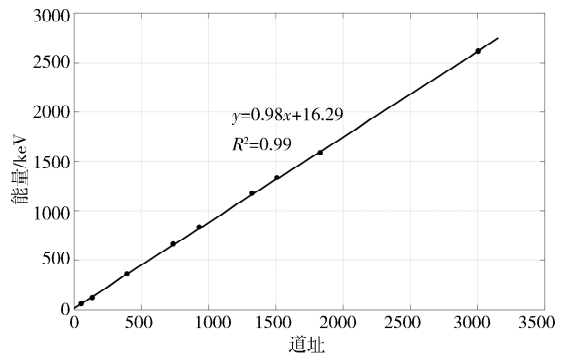


图 11  $\gamma$  能谱仪能量响应线性拟合曲线

Fig. 11 Linear fitting curve of energy response of  $\gamma$  spectrometer

### 4.3 长期稳定性测试

$\gamma$  能谱仪的长期稳定性是指测量环境条件和放射源保持不变的情况下,测量到的  $\gamma$  能谱峰位道址的稳定性. 实验通过固定好  $\gamma$  能谱测量仪和<sup>232</sup>Th $\gamma$  放射源的相对位置,并在程序上设置好单次能谱测量时间为 30 min,能谱测量时间间隔为 30 min. 保证谱仪供电正常同时测试环境温度稳定的情况下,设置仪器连续工作 48 h,共获得 48 个能谱. 统计这些能谱中<sup>232</sup>Th 源的 238 和 2 614 keV 两个特征峰峰位道址随时间的变化关系如图 12. 由图 12 可以看到谱仪在 48 h 连续工作的情况下具有良好的稳定性,通过计算得到 238 keV 特征峰峰位道址的最大相对偏差为 0.14%,2 614 keV 特征峰峰位道址的最大相对偏差为 0.22%.

#### 4.4 待机功耗和运行功耗测试

实验用线性电源给  $\gamma$  能谱仪提供 12 V 电源后,测得待机功耗为 8.40 mW. 当仪器进入工作模式时,测得运行功耗为 1.38 W. 由此推算,在选用 10 Ah 聚合物锂电池供电的情况下,如果谱仪每天测量时间 2 h,待机 22 h,谱仪可连续工作 40 d.

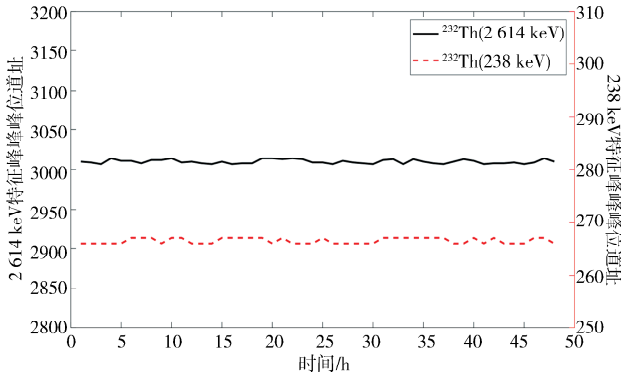


图 12  $\gamma$  能谱仪稳定性测试

Fig. 12 Stability test of  $\gamma$  spectrometer

## 5 结 论

本文研制了基于 STM32L4 系列微处理器的低功耗、高分辨、高集成度的自动  $\gamma$  能谱仪,谱仪整体尺寸仅为  $\phi 60 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$ . 能谱仪具有按照预先设置自动切换工作模式和待机模式的自动能谱测量功能,满足了反应堆安全壳内复杂环境下  $\gamma$  放射性的监测需求. 文章对该谱仪的能量分辨率、能量非线性、长期稳定性、待机功耗和工作功耗进行详细测试. 实验测得 662 keV  $\gamma$  射线能量分辨率为 3.0%;采用  $^{241}\text{Am}$ 、 $^{57}\text{Co}$ 、 $^{133}\text{Ba}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{60}\text{Co}$  和  $^{232}\text{Th}$   $\gamma$  放射源测得谱仪在 50~3 000 keV 能量区间的积分非线性为 9.5%;实验通过用  $^{232}\text{Th}$   $\gamma$  放射源连续 48 h 测试谱仪的能谱稳定性,计算得到 238 和 2 614 keV 特征峰峰位道址的最大相对偏差分别为 0.14% 和 0.22%;实验测得谱仪的工作功耗为 1.38W,待机功耗为 8.40 mW,以每天工作 2 h、待机 22 h 为例,采用 10 Ah 锂电池供电,谱仪可连续工作 40 d.

#### 参考文献:

- [1] 丁卫撑,李元景,王义,等. 可现场 GPS 定位的手持式  $\gamma$  能谱仪的设计[J]. 自动化仪表, 2010, 31: 62.
- [2] 中国核能行业协会. 2019 年 1~12 月全国核电运行情况[EB/OL]. (2020-02-12)[2020-10-28]. <http://www.china-nea.cn/site/content/36862.html>.
- [3] 李传江. 低功耗便携式  $\gamma$  能谱仪的设计与实现[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [4] 谢希成,赖万昌,赵祖龙,等.  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  与  $\text{NaI}(\text{Tl})$  闪烁探测器的性能研究与比较[J]. 核电子学与探测技术, 2014, 34: 918.
- [5] Saint-Gobain Crystals. Physical properties of common inorganic scintillators [EB/OL]. [2020-10-28]. [https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/physical-properties-of-inorganic-scintillators\\_0.pdf](https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/physical-properties-of-inorganic-scintillators_0.pdf).
- [6] Heifets M, Margulis P. Fully active voltage divider for PMT photo-detector [C]// Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference. [S. l.]: IEEE, 2012.
- [7] 王经瑾. 核电子学. 上册[M]. 北京: 原子能出版社, 1983.
- [8] Analog Devices Corporation. High performance, 145 MHz fast FET OP amps AD8065/ AD8066 datasheet [EB/OL]. (2019-01-10)[2020-10-28]. [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8065\\_8066.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8065_8066.pdf).
- [9] 祁中,李东仓,杨磊,等. 基于低通 S-K 滤波器的核脉冲成形电路[J]. 兰州大学学报(自科版), 2008, 44: 137.
- [10] 北京滨松光子技术股份有限公司. CC228 系列高压电源模块[EB/OL]. (2019-01-15)[2020-10-28]. [http://www.bhphoton.com/Upload/高压电源模块/CC2280910/CC22809\\_10-13535341140.pdf](http://www.bhphoton.com/Upload/高压电源模块/CC2280910/CC22809_10-13535341140.pdf).
- [11] ST Microelectronics Corporation. STM32L476xx datasheet [EB/OL]. (2019-06-07)[2020-10-28]. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l476rg.pdf>.

#### 引用本文格式:

中文: 陈琦,王忠海,张肇驿,等. 高集成度自动化  $\gamma$  能谱仪[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2021, 58: 044001.  
英文: Chen Q, Wang Z H, Zhang Z Y, et al. Highly integrated automated  $\gamma$  spectrometer [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2021, 58: 044001.