

便携式多功能辐射检测仪设计

杨 松 张晓泉 邓长明 张艳婷 许 非 关玲玲 段少强

(中国辐射防护研究院 太原 030006)

摘要 为了满足便携式辐射测量仪同时测量X、 γ 和中子辐射场的需求,设计基于LaBr₃(Ce)晶体、硅酸锂铝(Lithium Aluminum Silicate Oxygen, LASO)型中子探测器、高量程盖革-米勒(Geiger-Muller, GM)计数管的便携式多功能辐射检测仪。对LaBr₃晶体输出的光信号经光电倍增管光电转换后,采用一体化数字多道进行数据采集处理及运算,对中子探测器和GM管计数器分别设计前置信号处理电路,并对其进行放大、甄别、整形等处理。最后将LaBr₃探测器处理的数字信号以TTL(Transistor-Transistor Logic)串口形式传输给ARM(Advanced RISC Machine)处理器,将中子探测器和GM计数管成形后的脉冲信号接入到ARM外部计数端口。ARM对LaBr₃探测器采集的 γ 数据进行能谱显示、低剂量率测量,对中子探测器、高量程GM管计数器分别进行定时计数,通过计数率换算成剂量率进行显示。该便携式多功能辐射检测仪可实现宽量程 γ 、低能X射线和中子剂量率的同时测量以及LaBr₃能谱仪的核素识别,并通过USB接口将数据上传到PC端。

关键词 低能X射线测量, 宽量程 γ 测量, γ 核素识别, 中子测量

中图分类号 TL751

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.110403

Design of portable multi-function radiation detection system

YANG Song ZHANG Xiaoquan DENG Changming ZHANG Yanting XU Fei

GUAN Lingling DUAN Shaoqiang

(China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China)

Abstract [Background] In order to fast and conveniently measure X, γ and neutron radiation field simultaneously, portable multi-function radiation detector is highly demanded. [Purpose] This study aims to design a portable multi-function radiation detection system based on LaBr₃(Ce) crystal, lithium aluminum silicate oxygen (LASO) neutron detector and high range Geiger-Muller (GM) counter. [Methods] After the optical signal output from the LaBr₃ crystal was photoelectrically converted into electronic signal by the photomultiplier tube (PMT), the integrated digital multi-channel was used for data acquisition of electronic signal, and the subsequent data processing and calculation. The front signal processing circuits, such as amplification, discrimination and shaping, were designed for both the LASO neutron detector and the GM tube counter. Finally, the digital signal processed of the LaBr₃ detector was transmitted to the ARM (Advanced RISC Machine) processor in the form of TTL (Transistor-Transistor Logic) serial port, and the pulse signal formed of the neutron detector and GM counter tube was connected to the external counting port of ARM processor. Energy spectrum was processed for nuclide identification and displayed by ARM processor whilst the low dose rate measurement base on the Gamma data collected by the LaBr₃ detector, the neutron detector and the high range GM tube counter were counted at fixed time and converted from the count rate into the dose rate. [Results & Conclusions] The designed portable multi-function radiation detector realize simultaneous measurement

第一作者: 杨松, 男, 1989年出生, 2014年于山东科技大学获硕士学位, 研究领域为核仪器仪表应用研究

通信作者: 邓长明, E-mail: cmdeng@sina.com

收稿日期: 2022-08-30, 修回日期: 2022-10-14

First author: YANG Song, male, born in 1989, graduated from Shandong University of Science and Technology with a master's degree in 2014, focusing on application research of nuclear instruments

Corresponding author: DENG Changming, E-mail: cmdeng@sina.com

Received date: 2022-08-30, revised date: 2022-10-14

of wide range (48 keV~3.0 MeV) γ , low-energy (48 keV~1.25 MeV) X-ray, (0.1~100 mSv·h⁻¹) neutron dose rates, and nuclide identification capability of LaBr₃ spectrometer, and upload the data to PC through USB interface.

Key words Low energy X-ray measurement, Wide range γ measurement, γ nuclide identification, Neutron measurement

目前,传统的便携式辐射测量仪一般为单台专用设备,根据被测对象的放射性类型选择合适的探测器及后端处理电路,研制出相应的辐射探测仪来满足特定辐射场下辐射测量的需求^[1-2]。随着核科学技术的不断发展,在核辐射探测领域也加快了研发步伐。新的探测材料,新的技术,使得核辐射探测器在小型化、量程、效率、灵敏度、可靠性方面都得到了提升,其中便携式多功能辐射检测仪成为研发热点之一。然而便携式一体化辐射测量仪要满足在混合辐射场下 γ 核素的快速识别、 η - γ 甄别、低能X射线的同时测量,对检测仪的设计提出了更高的要求。LaBr₃(Ce)晶体由于其高能量分辨率的优势而广泛应用于核素识别^[3],硅酸锂铝(Lithium Aluminum Silicate Oxygen, LASO)型中子探测器具有非常好的 η - γ 甄别能力,在探测一定范围能量的中子是反应能为一固定值,因此形成的脉冲幅度也是固定值,用脉冲幅度甄别可以实现 η - γ 混合场的测量^[4-5], ZP1301型盖革-米勒(Geiger-Muller, GM)管计数器

具有高辐射场下的测量优势。由此,本文针对不同辐射场测量的需求^[6-7],设计一款集 $\varnothing 38$ mm×高38 mm的LaBr₃(Ce)晶体、ZP1301型盖革-米勒管计数器、LASO型中子探测器多个探头为一体的便携式辐射测量仪,针对不同探测器输出的核脉冲幅度特征设计相对应的高压及信号处理电路,对于能谱识别采用美国ORTEC公司数字一体化多道进行高速采集与数字化处理。最后,将前端处理的数字信号传入到ARM(Advanced RISC Machine)控制器上进行分时采集、显示、上传等功能。

1 总体设计

图1为多功能辐射检测仪总体结构图。主要包括:探测器单元、信号处理系统、控制系统等部分。该检测仪可同时测量周围X、 γ 、n辐射水平,并具有核素识别的功能。检测仪总体设计具有宽量程、精度高、智能化、便携式等特点,整体外观实物图见图2。

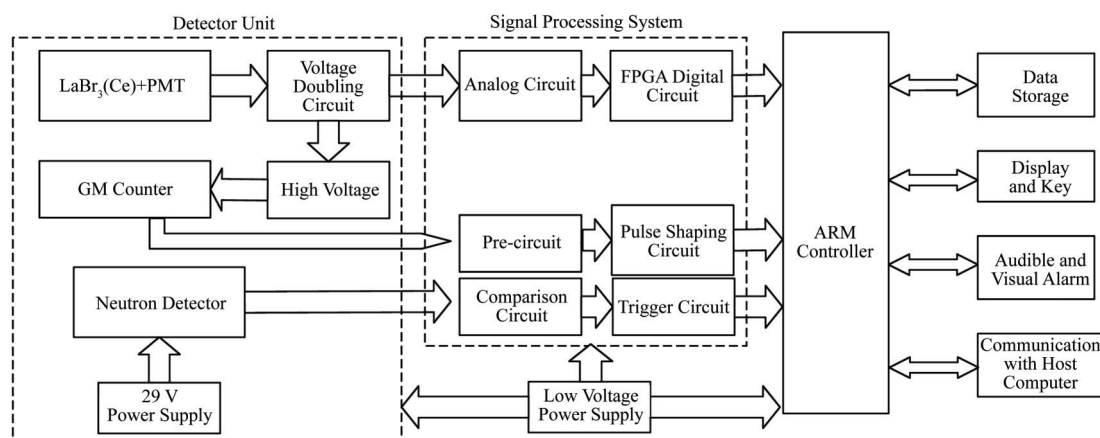


图1 便携式多功能辐射检测仪总体结构图
Fig.1 Overall structure diagram of portable multi-function radiation detector

2 部件设计

2.1 GM计数管信号处理电路设计

GM计数管相比闪烁体和半导体探测器,具有输出信号幅度大、前置信号处理电路简单、环境适应性强、体积小等特性,在便携式核仪表中广泛被应用,其信号处理电路包含前置信号处理电路和信号成形电路^[8],R1为计数管的阳极限流电阻,推荐为

M Ω 级,R2为计数管阴极取样电阻,初始信号从计数管与阴极电阻之间输出,经过电容C1耦合,电阻R3为输出脉冲时间常数调节电阻,经RC电路输出脉宽不会太大,适应了高计数率,输出的脉冲幅度也不至于太小。然后经过Q2三极管和U1施密特触发器SN74LVC1G14组成的单稳成形电路,输出合适的方波,以接入到ARM控制器的外部计数端进行数据采集。图2为GM计数管信号处理电路。

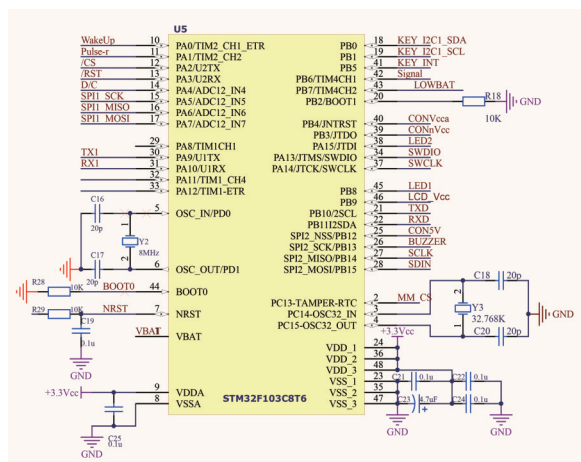


图5 最小系统控制电路

Fig.5 Minimum system control circuit

2.4.2 软件设计

软件设计是在Keil5 MDK上用C语言完成的,程序主要包括:低功耗模式配置、OLED显示初始化、USART串口传输配置、外部按键中断、定时器中断、剂量率拟合及突变算法、低能X射线能量补偿算法等。首先,执行系统初始化,读取Flash中的配置参数;然后仪器进入低功耗模式等待开机唤醒,低功耗模式配置成待机模式,此时模式系统会关闭所有的时钟以及外设,电流可降低超400 mA。开机后仪表进入主界面显示,开始X、 γ 数据采集,对ARM处理器采集的X、 γ 脉冲数据进行平滑和突变算法处理,然后在不同剂量下进行多点拟合得出剂量率。对于低能X射线采用能谱法进行能量补偿,根据特征峰信息可以把能谱数据的低能区分成若干段,每一区间对应一个能量补偿因子^[11]。程序定时扫描是否有外部按键中断,当有按键指令后会进入不同的功能界面,包括中子剂量率测量、核素识别、参数设置、上位机通信等。中子剂量率测量是根据不同的中子剂量场下仪器得到的计数率转换成剂量率所得,软件内部编写了对应的刻度公式。核素识别部分采用的是ORTEC提供的函数库,可直接调用其库函数实现,其中稳谱部分采用软件稳谱方法,利用K峰(1.46 MeV)的特征峰进行实时寻峰,在探测器放大增益固定的情况下,通过调整LaBr₃探测器的高压值,将K40峰位调整到固定的道址,从而实现稳峰的目的。参数设置主要是对仪表的报警阈值、刻度因子、测量周期等进行修改,最后多功能便携式仪表预留了USB通信接口,可以根据上位机指令上传相应的数据。软件设计流程图如图6所示。

3 主要性能测试与讨论

本仪表根据不同的探测器进行辐射测量,通过

切换不同的测量界面实现X、 γ 、中子剂量率的测量以及放射性核素的识别。在混合场下,仪表开机默认进入X、 γ 剂量率的自动测量界面,并实时更新X、 γ 剂量率的测量数据。通过按键设置切换到中子剂量率测量界面,中子探测器开始工作,并自动对混合场中的中子剂量率进行测量。对于可疑放射源进行核素识别时,仪表开机进入主界面需远离放射源,然后按键切换到核素识别界面,点击“采集”按钮开始测量,默认采集时间60 s,待数据采集完毕,仪表自动进行核素识别并显示识别结果。

3.1 剂量当量率测量

本次仪表放射性实验在国防科技工业电离辐射一级计量站进行,仪器本底 γ 计数平均值 $0.162 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$,经在参考辐射源¹³⁷Cs、⁶⁰Co源下测试,仪表的 γ 剂量当量率相对固有误差 $\leq \pm 20\%$,满足便携式X、 γ 辐射周围剂量当量(率)仪检定规程^[12]。表1为 γ 剂量当量率相对固有误差测试结果,测量范围涵盖 $10^{-1} \sim 10^7 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ 8个数量级的宽量程。GM计数管在该便携式仪表中实现高量程剂量率的测量,当 γ 剂量率大于 $100 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,硬件后会自动切换成GM计数管测量。本仪表采用的GM的剂量率测量范围可达 $10^2 \sim 10^7 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

仪表中所用的中子探测器,在本底环境下中子剂量率测量值为 $0.1 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$,测量范围可达 $0.1 \sim 100 \text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$,相对于²⁵²Cf源其灵敏度 $\geq 5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$,采用Am-Be和²⁵²Cf中子源进行测试,测量结果如表2所示,相对固有误差 $\leq \pm 15\%$,满足中子周围剂量当量(率)仪检定规程^[13]。

3.2 X、 γ 射线能量响应测量

对于仪表的能量范围要求满足48 keV~3 MeV,针对LaBr₃探测器和GM探测器的能量响应是否满足国标要求,LaBr₃探测器分别在特征能量为48 keV、60 keV、87 keV、149 keV、211 keV的X射线和¹³⁷Cs、⁶⁰Co标准辐射场下测试,能量响应测试结果如表3所示。

通过表3的测试结果来看,采用能谱法进行低能X射线能量补偿的方法,实现了在48 keV~1.25 MeV能量范围内的准确测量,能量响应误差 $\leq \pm 15\%$ 。对于经能量补偿的GM探测器,能量响应实验分别在特征能量为48 keV、65 keV、83 keV、100 keV、118 keV、164 keV、250 keV的X射线和¹³⁷Cs、⁶⁰Co标准辐射场下测试,能量响应测试结果如表4所示。

通过表4的测试结果看,经物理补偿后的GM探测器,实现了在48 keV~1.25 MeV能量范围内的

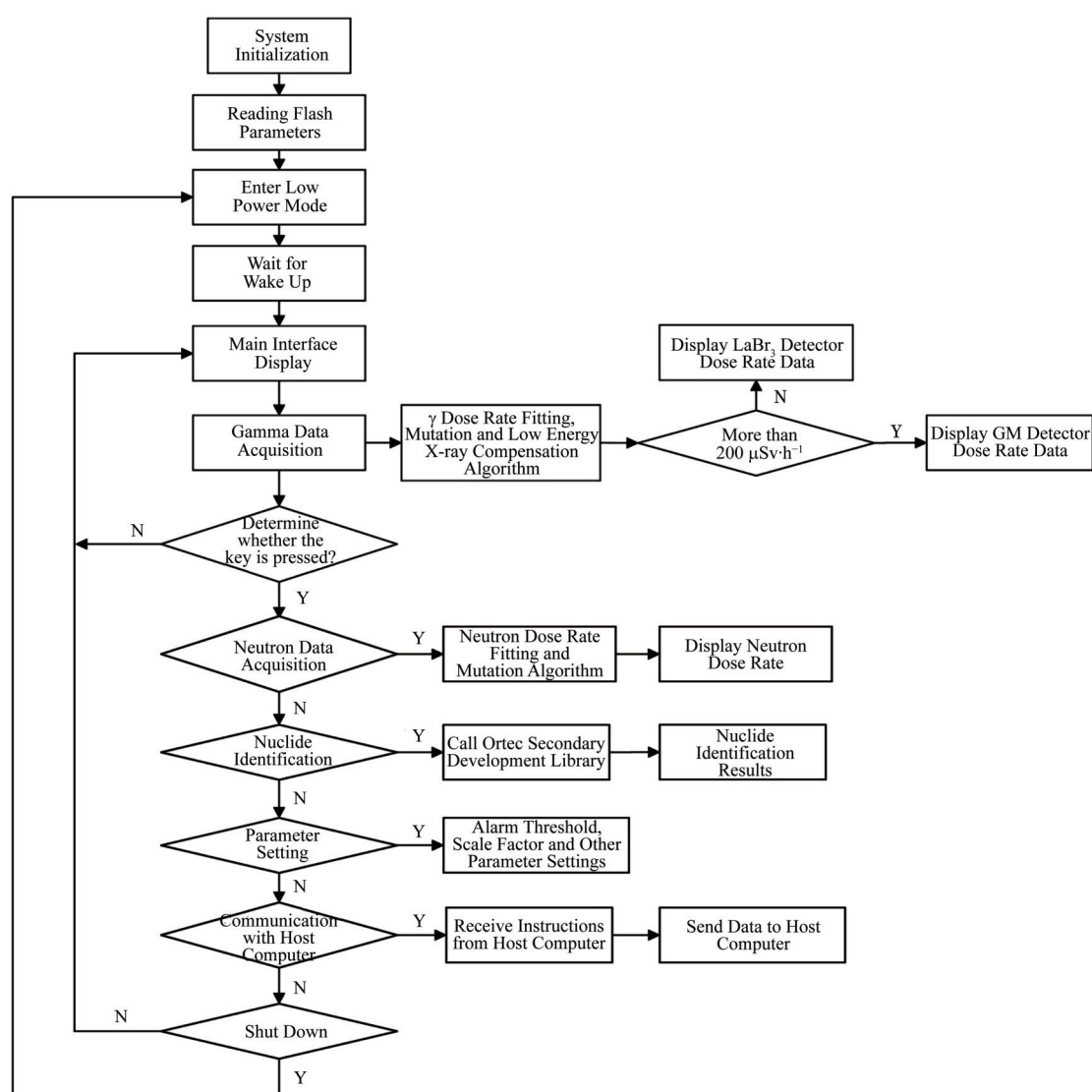


图 6 软件设计流程图
Fig.6 Software design flow chart

表 1 γ 剂量当量率相对固有误差测试结果
Table 1 Test results of relative intrinsic error of γ dose equivalent rate

参考辐射场 Reference radiation field	约定真值 Conventional truth value / mSv·h ⁻¹	平均值 Average value / mSv·h ⁻¹	相对误差 Relative error / %
¹³⁷ Cs	5.71×10 ⁻⁴	8.27×10 ⁻⁴	15
¹³⁷ Cs	6.03×10 ⁻³	7.11×10 ⁻³	15
¹³⁷ Cs	6.47×10 ⁻²	7.54×10 ⁻²	16
¹³⁷ Cs	1.20×10 ⁻¹	1.41×10 ⁻¹	17
¹³⁷ Cs	5.99×10 ⁻¹	5.24×10 ⁻¹	-13
¹³⁷ Cs	6.08	5.21	-14
¹³⁷ Cs	59.8	48.7	-18
¹³⁷ Cs	435	404.0	-7.1
⁶⁰ Co	551	487.0	-12
⁶⁰ Co	720	618.5	-14
⁶⁰ Co	1 164	995.0	-15

表 2 中子剂量当量率相对固有误差测试结果
Table 2 Test results of relative intrinsic error of neutron dose equivalent rate

参考辐射场 Reference radiation field	约定真值 Conventional truth value / μSv·h ⁻¹	平均值 Average value / μSv·h ⁻¹	相对误差 Relative error / %
Am-Be	66.5	60.4	-9.2
Am-Be	220	229.1	4.1
²⁵² Cf	708	744.3	5.1
²⁵² Cf	2 340	2 260	-3.4

较准确地测量, 能量响应误差≤±30%。

3.3 能量分辨率

能量分辨率是表征核辐射探测器分辨相近能量 γ 峰的本领, 是探测器的一项重要指标。本文设计的便携式多功能辐射检测仪基于 LaBr₃ 探测器具有较

表3 LaBr₃探测器能量响应测试结果
Table 3 Test results of LaBr₃ detector energy response

参考辐射场 Reference radiation field	约定真值 Conventional truth value / $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$	平均值 Conventional truth value / $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$	响应 Response	能量响应 Energy response
L-55	48.9	38.9	0.90	1.01
L-70	50.3	43.3	0.86	0.96
L-100	50.9	44.5	0.87	0.97
L-170	46.5	42.0	0.90	1.01
L-240	41.4	36.7	0.89	1.00
¹³⁷ Cs	36.6	44.0	0.89	1.00
⁶⁰ Co	34.2	39.1	1.14	1.28

表4 GM管能量响应测试结果
Table 4 Test results of GM detector energy response

参考辐射场 Reference radiation field	约定真值 Conventional truth value / $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$	平均值 Conventional truth value / $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$	响应 Response	能量响应 Energy response
N-60	865	649.7	0.75	0.85
N-80	938	1 029.0	1.10	1.25
N-100	927	1 050	1.13	1.28
N-120	891	884.2	0.99	1.13
N-150	1 283	1 218	0.95	1.08
N-200	821	833.4	1.02	1.16
N-250	791	744.4	0.98	1.11
¹³⁷ Cs	823	727	0.88	1.00
⁶⁰ Co	486	434	0.89	1.01

高的核素识别能力,仪表将原始的能谱数据通过USB上传到上位机软件进行计算分析。实验将¹³⁷Cs标准点源(活性区 $\leq\varnothing 3\text{ mm}$)置于距探测器中心垂直距离10 cm处,为了保证测量的准确性,¹³⁷Cs全能峰总计数大于10⁴,通过测试分析LaBr₃探测器对于¹³⁷Cs的662 keV射线的能量分辨率可达2.8%,远远优于NaI(Tl)探测器的7%~8%的分辨率,能量分辨率测试如图7所示。

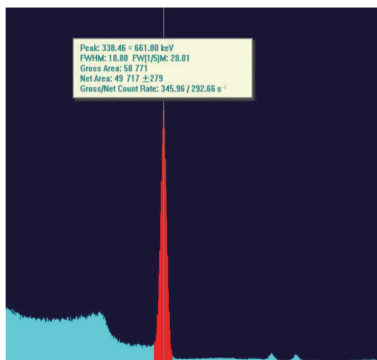


图7 能量分辨率测试
Fig.7 Energy resolution test

3.4 环境适应性、电磁兼容以及可靠性试验

便携式多功能辐射测量仪在设计完成后,对环境适应性、电磁兼容、可靠性进行了试验^[14]。环境适应性及可靠性试验在苏试试验北京实验室进行,电磁兼容试验在北京东方计量测试研究所进行。环境试验中对仪表的低温、高温、恒定湿热、低气压进行了试验,其中温度在-20~45℃范围,相对湿度93%,气压在常压0.5 kPa范围,仪表的外观和结构以及基本性能均正常。在外部辐射场的耦合形成干扰信号的环境下,对本设计的检测仪没有产生敏感现象,指示灯显示及功能状态正常,图8是电磁兼容现场实验图。可靠性试验总时长为100 h,试验中检测仪未发生故障,测量数据正常。

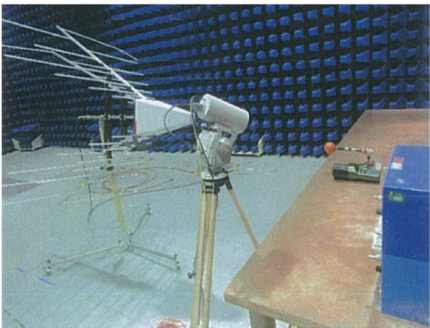


图8 电磁兼容实验
Fig.8 Electromagnetic compatibility experiment

4 结语

本文设计的便携式多功能辐射检测仪基于多种探测器为一体,设计相应的硬件电路及软件程序,整体设计紧凑,具备搜索、检测、报警、数据上传等功能。通过对其主要性能进行测试,具有较好的抗干扰能力,工作稳定,实现了X、 γ 、中子剂量当量率的准确测量以及高分辨率的核素识别。可应用到放射性混合场下快速、准确地判别放射性核素种类及辐射强度要求,为环境辐射监测、核反恐安检、辐射源清理和其他核技术应用领域提供理想的检测手段。

本文设计的LASO中子探测器具有优异的性能参数,但由于整机结构的限制,只考虑该探测器作为中子剂量率测量使用,后续可对中子能谱的测量做进一步地研究,另外该便携式仪表对 γ 剂量率具有宽量程的测量,但对GM管的能量响应偏差较大,后续可通过实验修正的方式提高其测量的精度。

作者贡献声明 杨松:负责文章的起草、收集文献以及整体方案设计;张晓泉:负责研究的提出和设计;邓长明:负责技术指导并对文章的知识性内容作批评性审阅;张艳婷:负责硬件研制;许非:负责文献收

集和校对;关玲玲:负责软件开发;段少强:负责实验测试。

参考文献

- 王婷婷, 张庆威, 刘福至, 等. 多功能主机便携式辐射测量仪表设计[J]. 核电子学与探测技术, 2019, **39**(1): 13 - 17. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2019.01.004.
WANG Tingting, ZHANG Qingwei, LIU Fuzhi, *et al.* Design of portable radiation measuring instrument based on multi-function meter[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2019, **39**(1): 13 - 17. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2019.01.004.
- 陈志强, 陈晶晶, 舒双宝, 等. LaBr₃(Ce)探测器探测效率影响因素研究[J]. 核技术, 2022, **45**(1): 010401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.010401.
CHEN Zhiqiang, CHEN Jingjing, SHU Shuangbao, *et al.* Simulation study on the factors affecting the detection efficiency of a LaBr₃(Ce) detector[J]. Nuclear Techniques, 2022, **45**(1): 010401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.010401.
- 李民. LaBr₃(Ce)闪烁体的辐射探测性能研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
LI Min. Study on radiation detection performance of LaBr₃(Ce) scintillator[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- 周悦, 于华伟, 王猛, 等. 基于CLYC探测器的可控源中子孔隙度测井数值模拟研究[J]. 核技术, 2021, **44**(4): 040501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.040501.
ZHOU Yue, YU Huawei, WANG Meng, *et al.* Numerical simulation of controllable source neutron porosity logging based on CLYC detector[J]. Nuclear Techniques, 2021, **44**(4): 040501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.040501.
- 许助. 基于LASO探测器的数字化能谱仪的研制[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
XU Zhu. Development of digital spectrometer based on LASO detector[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 辐射防护仪器 β 、X 和 γ 辐射周围和/或定向剂量当量: GB/T 4835.1—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Radiation protection instrumentation - ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation - Part 1: portable workplace and environmental meters and monitors: GB/T 4835.1—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 辐射防护仪器中子周围剂量当量: GB/T 14318—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Radiation protection instrumentation—neutron ambient dose equivalent (rate) meters: GB/T 14318—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- 杨团伟, 邵晖, 樊海军, 等. GM计数管的信号采集与处理[J]. 核电子学与探测技术, 2014, **34**(6): 720 - 723.
YANG Tuanwei, SHAO Hui, FAN Haijun, *et al.* GM-counter tube signal acquisition and processing[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2014, **34**(6): 720 - 723.
- 李自成, 袁保山. 改进型低纹波 Cockcroft-Walton 倍压电路及其特性研究[J]. 科学技术与工程, 2014, **14**(17): 64 - 67, 77.
LI Zicheng, YUAN Baoshan. Advanced low ripple Cockcroft-Walton voltage multiplier circuit and its characteristics research[J]. Science Technology and Engineering, 2014, **14**(17): 64 - 67, 77.
- 王晴晴, 任国浩. 中子探测用钾冰晶石型闪烁晶体研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2016, **44**(3): 457 - 463. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.2016.03.18.
WANG Qingqing, REN Guohao. Recent development on elpasolite scintillation crystals for neutron detection[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, **44**(3): 457 - 463. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.2016.03.18.
- 任晓娜, 胡遵素. 用 NaI(Tl)探测器测量 γ 辐射场剂量特性的加权积分法研究[J]. 辐射防护, 2003, **23**(2): 65 - 73.
REN Xiaona, HU Zunsu. Study on a weighted integration method by using NaI(Tl) detector for measuring dosimetric properties of the gamma-radiation field[J]. Radialization Protection, 2003, **23**(2): 65 - 73.
- 国家市场监督管理总局. 便携式 X、 γ 辐射周围剂量当量: JJG 393—2018[S]. 北京: 中国质检出版社, 2018.
State Administration for Market Regulation. Portable ambient dose equivalent (rate) meters and monitors for X and gamma radiations: JJG 393—2018[S]. Beijing: State Market Regulatory Administration, 2018.
- 国家技术监督局. 中子周围剂量当量(率)仪检定规程:

- JJG 852—2006[S]. 北京: 中国计量出版社, 2007.
- State Bureau of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. Verification regulation of neutron ambient dose equivalent (rage) meters: JJG 852—2006[S]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2007.
- 14 中华人民共和国公安部. 便携式放射性物质探测与核素识别设备通用技术要求 第1部分: γ 探测设备: GA/T 1060.1—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- The Ministry of Public Security of the People's Republic of China. General technical requirements for portable instruments for radioactive material detection and radionuclides identification - Part 1: γ -ray detection instruments: GA/T 1060.1—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.