

多功能宽量程辐射探测系统研制

黄茜¹ 龚频^{1,2} 闻良生¹ 王鹏¹ 汤晓斌^{1,2} 陈达^{1,2}

(1. 南京航空航天大学核科学与工程系, 南京 210016; 2. 江苏省核能装备材料工程实验室, 南京 210016)

摘要: 论文介绍一种多功能宽量程辐射探测系统的研制。该系统选用 GM 管与 NaI(Tl) γ 谱仪, 通过嵌入式设计、实验标定、能谱剂量率转换、软件开发等工作实现系统的宽剂量率量程、双参数探测、自动温漂修正、无线数据传输和探测轨迹标定等功能。该系统可搭载无人旋翼机等设备进行远程探测, 具有一定的辐射环境分析能力。实验表明该系统在 0.01 $\mu\text{Gy/h}$ ~ 100 mGy/h 的辐射场内剂量率测量误差小于 8%, 上位机能在 3 km 距离获取作业路径、 γ 能谱和剂量率等探测信息。

关键词: NaI(Tl) γ 谱仪; GM 计数管; 剂量仪; 远程探测

中图分类号: TL 812 **文献标志码:** A **文章编号:** 0258-0934(2016)3-0245-05

剂量率和 γ 能谱是放射性评估中最关心的两个参数, 我国环保部门一般采用单一功能的探测器^[1], 分析辐射场往往需要多个探测器同时工作。美国有过双探测器系统的先例, 但多用于大型辐射事故分析^[2]。对于高剂量率的辐射场, 移动式设备具有反应迅速、避免人员辐射损伤等优点^[3-5], 英国的 J. W. MacFarlane 等人曾将小型探测器安装在无人旋翼机上进行远程测绘, 但只能得到计数率参数^[6], 目前我国的核探测设备大多不具备远程分析的能力。针对现有设备的不足, 本工作选用 GM 管与 NaI(Tl) γ 谱仪, 将传统核仪器与嵌入式等新技术结合, 研发一套新型辐射探测系统, 该系统可独立用于环境辐射场进行完整探测分析, 远程探测直接降低辐射场对工作人员的损伤, 具

有一定的应用价值。

1 系统介绍

本系统主要由 NaI(Tl) γ 谱仪、GM 计数管、嵌入式主板(含 GPS 芯片)、电源控制电路板、嵌入式 Windows 主板、无线传输以及上位机软件组成, 实物图如图 1, 系统工作示意图如图 2 所示。电源控制板将 5 V 的输入电压分别转换为 9、12、24 V 等电压给各模块供电; 嵌入式主板控制 GM 管和 GPS 芯片工作, CPU 实时采集 GM 管计数和 GPS 信息并发送给嵌入式 Windows 主板; Windows 主板将 GM 管剂量率数据、NaI(Tl) γ 谱仪数据、GPS 信息等整合处理, 通过无线传输发送给上位机; 上位机能够实时显示探测单元传回的 γ 能谱和剂量率等数据, 并根据 GPS 位置信息在地图上标注各点的剂量率值; 上位机软件采用数据库管理, 能够随时查询和分析历史数据信息。

2 原理与方法

2.1 双参数宽量程测量

GM 计数管被广泛应用于 X、 γ 射线的剂量率测量, 但其固有的低能段过响应问题一直存

收稿日期: 2016-01-23

基金项目: 国防基础科研项目(B2520133007)、南京航空航天大学研究生创新基地开放基金(kfj20150609)资助。

作者简介: 黄茜(1991-), 男, 湖北荆州人, 硕士研究生, 主要从事辐射探测成像与核仪器研发。通信作者: 汤晓斌, 男, 副教授, E-mail: tangxiaobin@nuaa.edu.cn。

在低能低剂量率测量时往往有较大误差。相比 GM 计数管, NaI(Tl) γ 谱仪在低能段具有很好的能量响应,而在高剂量率的测量中死时间的增大会造成较大测量误差。综合考虑两种辐射探测器的工作特性,本系统采用双探测器同时工作模式,上位机在低、高剂量率环境下自动选用 NaI(Tl) γ 谱仪、GM 计数管探测数据,两者相互补充使得系统既能同时测得剂量率和 γ 能谱两种数据,又对剂量率量程进行了扩宽,增加了系统的适用范围。

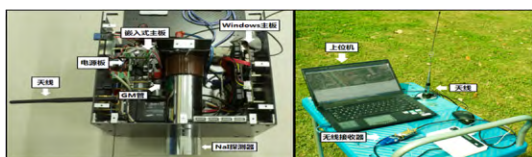


图1 多功能宽量程辐射探测系统实物

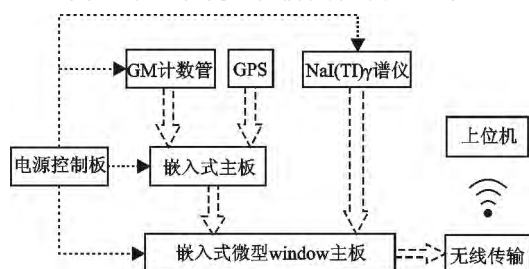


图2 多功能宽量程辐射探测系统示意

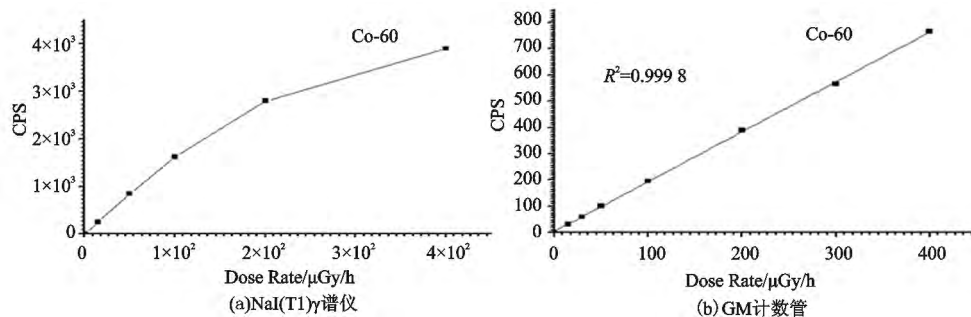


图3 探测器剂量率响应关系曲线

2.2 嵌入式程序设计

本系统中,嵌入式系统采用恩智浦半导体公司的 LPC1549 型 CPU,通过 Keil5 软件和 C 语言编程进行开发。采用高性能微处理器,为实现 GM 计数管剂量仪的准确性提供了保证^[8]。嵌入式程序主要用于控制 GM 管、传感器和 GPS 等芯片的工作状态,并负责获取和传输数据。开发中为了提高嵌入式系统的运行效率,运用 CMSIS_OS 系统创建 2 路线程和 1 路定时器进行多任务管理。在 CMSIS_OS 系统中,线程具有较高的运行效率,而定时器虽然对

系统设计中采用:(1) ORTEC 公司的 NaI(Tl) γ 谱仪,晶体为 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,能量响应为 $0.04 \sim 3 \text{ MeV}$,理论剂量率测量范围为 $0.01 \sim 100 \mu\text{Gy/h}$; (2) LND 公司的金属阴极 GM 计数管,管长 5 cm ,理论剂量率测量范围为 $0.1 \sim 100 \text{ mGy/h}$ 。在低水平的放射性测量中采用 NaI(Tl) γ 谱仪的能谱转换剂量率数据,在高水平放射性测量中采用 GM 管探测单元的剂量率数据。

为确定上位机软件中剂量率来源的切换阈值,需先测定两种探测器的线性范围:在江苏省计量科学院电离辐射与医学工程计量研究所中,进行 $5 \sim 400 \mu\text{Gy/h}$ 辐射场照射实验。两种探测器的剂量率响应曲线如图 3:图中可见 NaI(Tl) γ 谱仪在 $0.01 \sim 200 \mu\text{Gy/h}$ 范围内具有良好线性关系;GM 计数管在 $10 \sim 400 \mu\text{Gy/h}$ 范围内具有良好的线性关系,且线性率与厂商提供数据一致,因此可认为 GM 管在 $0.01 \sim 100 \text{ mGy/h}$ 范围同样具有良好线性关系。综合考虑,将上位机剂量率切换阈值设定在 $100 \mu\text{Gy/h}$ 。

CPU 占用较高,但在计时上具有更高的准确度^[9]。因此,传感器等数据采集任务和串口通讯任务采用线程,需要保证时钟精度的 GM 管数据采集任务使用定时器。

电路板上电后主程序自动开始运行,led 线程每秒采集并存储一次传感器和 GPS 芯片数据;串口线程每秒完成一次数据的校验和发送;GM 管每产生一个脉冲信号便触发一次 GM 管计数的中断服务子程序;定时器每秒读取一次 GM 管计数并存储;具体工作流程如图 4 所示。根据实验标定过的 GM 管计数率与剂量率的关

系曲线,处理器将采集的GM管计数率换算成剂量率值,实现GM管剂量仪功能^[10]。

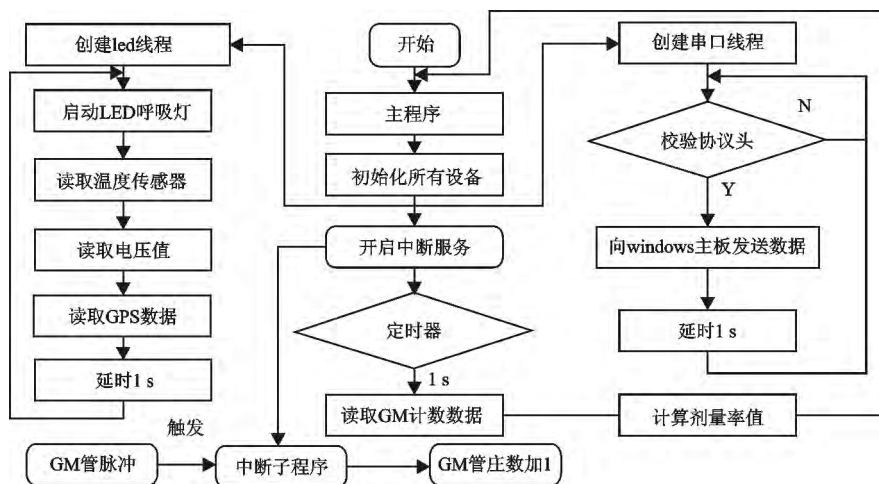


图4 嵌入式程序工作流程图

2.3 NaI(Tl) γ 谱仪的能谱剂量率转换

本工作中,能谱剂量率的转换采用目前比较成熟的 $G(E)$ 函数法^[11]。求解 $G(E)$ 函数需要得到标准 γ 能谱和探测器实测能谱,由于放射源种类有限,实验往往只能测得有限个能量点的标准 γ 能谱,这对计算的精确度造成影响。本系统采用蒙特卡罗模拟的方法解决,建立 MCNP 模型为:各项同性的点源位于探测器表面正上方 50 cm 处,发射粒子权重为 1,发射源的粒子类型为光子;模拟尺寸为 $\varphi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的碘化钠晶体,外包装材为 2 mm 铝,反射层为 1 mm 玻璃;由于环境辐射能量一般低于 3 MeV,设定模拟能量范围为 0.04 ~ 2.5 MeV。常规的 $G(E)$ 函数计算中,通常选取十多个等能量间距的模拟点。考虑到本系统中,NaI(Tl) γ 谱仪主要用于低能低剂量率的测量,而低能段往往容易受到天然本底干扰,为提高系统探测准确度,模拟计算中采用非等间距的取点方式,增加低能段的取点密度,共取得 27 个模拟点。计算得 $\varphi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ NaI(Tl) γ 谱仪的 $G(E)$ 函数曲线如图 5,该方法提高了能谱剂量率转换的准确度。

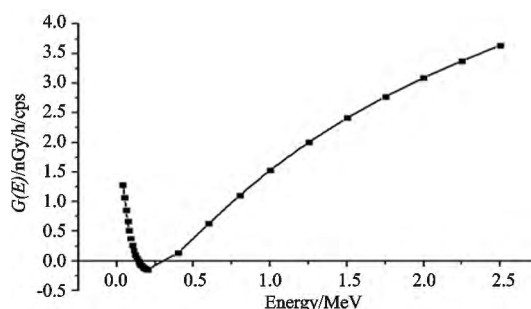


图5 NaI(Tl) γ 谱仪的 $G(E)$ 函数曲线

上位机获取 γ 能谱图后,对探测系统所得 γ 能谱每道计数进行加权计算,将 1 024 道的 γ 能谱的每一道乘以 $G(E)$ 函数权重值,再将总剂量值相加,即可得到 γ 能谱转换所得的剂量率值。程序流程图如图 6 所示。

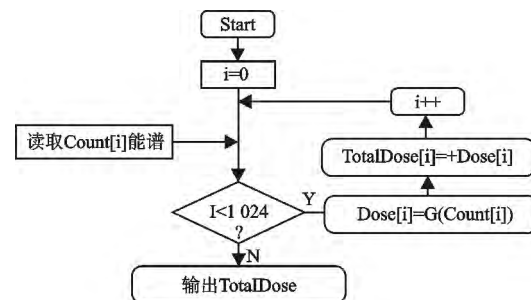


图6 能谱剂量转换程序流程图

测得的“仪器谱”与既定条件下的“标准谱”相比较,其峰位发生了变化^[11]。温漂现象一直是辐射测量中的难题,在 30 $^{\circ}\text{C}$ 温度变化下仪器测量误差最大可达到 30%,因此温漂修正工作是很必要的。通常的温漂修正方法是预先使用实验标准源进行能量刻度后再进行探测工作,但这种方法受实验条件的严重限制,也不能保证温度变化过程中的实时准确性。

2.4 NaI(Tl) γ 谱仪的温漂修正

温漂指能谱仪在不同温度下对同一物体所

本系统通过实验标定、曲线拟合、计算机程序处理实现作业过程中的自动温漂修正,可有效避免温度变化造成的测量误差,提高系统准

确度。主要工作分为: (1) 使用实验用⁶⁰Co和¹³⁷Cs放射源作为刻度源,在高低温试验箱中不同温度(-5~30℃)下对本系统选用的φ50mm×50mm NaI(Tl)γ谱仪进行能谱探测实验,得到各温度下的γ能谱;(2)根据所得不同温度下的γ能谱,记录下每个能谱中3个特征峰的道数值,拟合其道址随温度的变化曲线,如图7所示;(3)根据温漂曲线得到不同温度下的修正系数曲线,将修正函数写入上位机程序中。系统工作时,上位机实时获取温度传感器值选择对应温度的修正系数,自动完成γ能谱道址修正,使能谱在温度变化下趋于稳定。采用这种方法,本系统进行户外探测时无需再使用实验标准源刻度,做到了实时地自动温度修正,提高了系统准确度和环境适用性。考虑到仪器的老化等影响,建议两年进行一次温度的重新刻度。

3 性能测试与讨论

3.1 剂量率测试

考虑到本系统的剂量率量程跨度较大,将

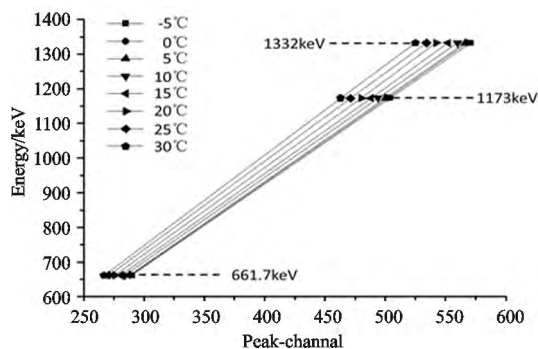


图7 ⁶⁰Co和¹³⁷Cs特征峰道址随温度变化曲线

剂量率测试分为3个部分。探测系统实测剂量率值与标准剂量率值对比数据如表1所示:(1)0.01~10μGy/h量级采用标准电离室进行测试,误差小于4%;(2)0.01~1mGy/h量级在江苏省计量院标准辐射场中进行测试,误差小于8%;(3)根据12到14号数据GM管计数率与厂商所给数据相符,与标准剂量率误差小于6%。根据GM管线性范围可认为GM管在0.01~100mGy/h范围具有小于6%的误差。表中可见,在剂量率值大于100μGy/h后,剂量率来源自动从γ谱仪切换到GM计数管。

表1 剂量率测试数据

序号	标准剂量率/ $\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$	标准值来源	实测剂量率/ $\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$	实测值来源	误差
1	0.08	电离室	0.082	γ谱仪	2.5%
2	0.25	电离室	0.256	γ谱仪	2.4%
3	0.41	电离室	0.416	γ谱仪	1.5%
4	1.32	电离室	1.276	γ谱仪	3.3%
5	1.68	电离室	1.724	γ谱仪	2.6%
6	2.36	电离室	2.441	γ谱仪	3.4%
7	3.80	电离室	3.674	γ谱仪	3.3%
8	5.08	电离室	5.152	γ谱仪	1.4%
9	15	江苏省计量院	13.832	γ谱仪	7.8%
10	50	江苏省计量院	47.856	γ谱仪	4.4%
11	100	江苏省计量院	106.727	γ谱仪	6.7%
12	200	江苏省计量院	206.126	GM管	3.1%
13	300	江苏省计量院	308.146	GM管	2.7%
14	400	江苏省计量院	421.158	GM管	5.3%

3.2 远程探测测试

使用实验用标准源⁶⁰Co和¹³⁷Cs对整套系统进行户外作业实验:将放射源置于大小为100m×300m的场地中的某处,使用本系统进行扫描式探测。通过无线传输实时分析环境辐射场,能够实时标定并记录各点的剂量率信息,并可调节能谱传输时间参数来应对不同情况的辐射场,也可通过数据库管理查询历史数据进行线下分析。实测中的γ能谱图,软件作业界面如图8所示:软件能够准确标注实验场地各

测量点的辐射剂量率值并显示探测轨迹;从γ能谱中能识别出两个放射源的3种特征峰;经测试上位机与辐射探测单元之间无遮挡时,能在3km的直线距离实现有效通讯。

4 结论

研发了一套具有完整辐射探测作业能力的新型辐射探测系统,与常规设备相比本系统具有更丰富的功能和更好的拓展性。经实验测试,各项指标达到预期。本系统可独立用于辐



图8 上位机作业软件界面图

射场的数据采样与分析;也可搭载移动式设备进行远程放射源搜寻等工作,避免辐射对人员的损伤;为辐射环境监测提供了一种新选择。其中,上位机软件中的探测路径标定模块可进一步改进与完善。

参考文献:

[1]陈亨贵. 一种多参数宽量程剂量率仪的研制[D]. 成都: 成都理工大学 2010.
 [2]Nilsson J M C, Östlund K, Söderberg J, et al. Tests of HPGe - and scintillation - based backpack γ - radiation survey systems[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2014, (135): 54 - 62.
 [3]Reinhart A, Ventura V, Athey A. Detecting changes in maps of gamma spectra with Kolmogorov - Smirnov

tests[J]. Nuclear Inst & Methods in Physics Research A, 2015, (802): 31 - 37.
 [4]Martin P G, Payton O D, Fardoulis J S, et al. The use of unmanned aerial systems for the mapping of legacy uranium mines[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2015, (143): 135 - 140.
 [5]Reuter P. Performance of an air sampler and a gamma - ray detector in a small unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Radioanalytical & Nuclear Chemistry, 2009, 282(2): 433 - 437.
 [6]Macfarlane J W, Payton O D, Keatley A C, et al. Lightweight aerial vehicles for monitoring, assessment and mapping of radiation anomalies[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2014, (136): 127 - 130.
 [7]殷小芳. 个人辐射剂量仪的研制[D]. 成都: 成都理工大学 2012.
 [8]李宁, 张国琛. 基于 CMSIS 标准的 Cortex - M3 应用软件开发[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2009, (11): 18 - 20.
 [9]Sang H L, Gardner R P. A new G - M counter dead time model[J]. Applied Radiation & Isotopes, 2000, (53): 731 - 737.
 [10]郭生良. γ 能谱的蒙特卡罗计算方法探与模拟软件设计[D]. 成都: 成都理工大学 2008.
 [11]杨焕章. 航空 γ 能谱探头温度效应及校正技术研究[D]. 成都: 成都理工大学 2009.

Design of A Multifunctional and Wide - Range Radiation Detection System

HUANG Xi¹, GONG Pin^{1,2}, WEN Liang - sheng¹, WANG Peng¹, TANG Xiao - bin¹, CHEN Da^{1,2}

(1. Department of Nuclear Science and Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Nuclear Energy Equipment Materials Engineering, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper introduced the development of a multifunctional and wide range radiation detection system. The system used GM tube and NaI (Tl) gamma spectrometer, through embedded design, experimental calibration, spectrum to dose conversion algorithm, software development and other work can achieve wide dose rate range, double parameters detection, automatic temperature drift correction, wireless data transmission and detection trajectory calibration function. The system can be equipped with unmanned rotor aircraft and other equipment for remote detection, which have a certain radiation environment. The experimental results show that the dose rate measurement error of system in the radiation field of 0.01 μ Gy/h ~ 100 mGy/h is less than 8%; In 3km distance, the upper PC can obtain the working path, the gamma ray spectrum and the dose rate.

Key words: NaI(Tl) detector; GM counter tube; dosimeter; remote detection