

小型旋翼机机载辐射环境监测系统的设计与实现^{*}闻良生¹, 龚 频^{1,2}, 黄 茜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: 利用小型旋翼机良好的机动性和环境适用性, 将小型旋翼机与传统的核辐射探测设备相结合, 再通过软硬件的开发、无线通讯、GPS 定位以及核数据处理技术的应用, 研发了一套具有受地形环境影响小、可避免人员受到近距离辐射损伤等优点的机载辐射监测系统。介绍了系统的结构组成、工作原理以及关键技术难点, 重点研究了系统关键模块的设计以及剂量率响应线性范围的测定。飞行实测结果表明, 该系统可对环境中的放射性实时、准确地测量, 可用于日常的辐射环境监测以及失控 γ 放射源的搜寻, 为核应急提供了一种新方法。

关键词: 小型旋翼机; 实时; 辐射环境监测; γ 放射源搜寻; 核应急

中图分类号: TL812

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB201628.160036

随着核技术的不断发展, 核应用领域不断拓宽, 核安全事故发生的概率也随之增加。为保证核工业生产活动的安全进行, 核电站等核设施周围需要进行定期的辐射监测与安全评估。但是由于核电站中一般建筑高度较高, 构造比较复杂, 有些地方人员无法靠近, 给日常的环境辐射监测带来了不便, 同时也埋下了安全隐患。除了日常的辐射环境监测, 放射源丢失事故也时有发生, 南京发生过一起工业用源 Ir-192 丢失事件。受地形条件的影响, 车辆根本无法靠近进行探测、实现精确定位, 只能通过人工手持探测器进行地毯式搜寻, 搜寻过程中人员需要近距离接触放射源, 对人体造成了电离辐射损伤。目前, 传统的核辐射监测方式主要有以下几种: (1) 人工手持式监测, 这种方式调度灵活, 但速度慢、监测范围小而且需要人员的近距离参与, 可能对人体造成辐射伤害^[1]; (2) 车载式监测, 这种方式监测范围较大, 但车辆受地形地势的影响较大, 有些地方无法进行精确探测^[2-3]; (3) 大型飞行器监测, 这种方式监测范围大, 速度快, 但其成本较高, 一般适用于大型核事故监测, 用于日常环境辐射监测不太现实^[4-6]; (4) 固定式监测, 这种方式所得到的监测数据准确, 可进行大范围监测, 但其设备庞大且缺乏机动性, 只能进行被动式监测^[7-9]。本文研发的这套小型旋翼机机载辐射监测系统可以有效弥补上述几种传统辐射监测、寻源方式所存在的不足。

1 系统结构及工作原理介绍

图 1 为系统结构框图, 整个系统分为探测器单元和飞行平台两个部分。探测单元主要包括电源模块、 γ 辐射探测模块、GPS 模块、无线电台、嵌入式模块以及 PC 主板等。电源模块主要完成不同电压的转换来给不同的设备供电。 γ 辐射探测模块包括 GM 计数管和 NaI(Tl) 探测器两种探测设备, GM 管主要完成对剂量率的测量, NaI(Tl) 探测器选用尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的探测器, 主要完成能谱的测量。飞行平台包括八旋翼无人机以及承重外壳。

整套系统的工作流程大致如下: 通过远距离控制小型旋翼机搭载探测设备进行低空飞行, 对待测区域进行辐射测量。嵌入式主板控制 GM 管剂量率数据以及 GPS 数据的实时采集与发送, 随后, 系统将 NaI

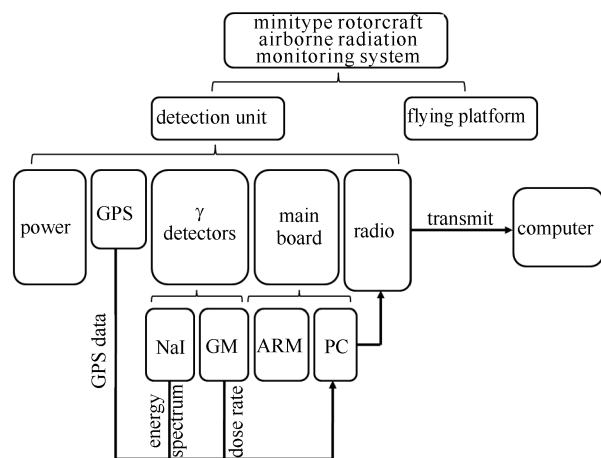


Fig. 1 Structure diagram of airborne radiation monitoring system

图 1 机载辐射监测系统结构框图

* 收稿日期: 2016-01-22; 修订日期: 2016-04-05

基金项目: 国防基础科研项目(B2520133007); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 南京航空航天大学研究生创新基地开放基金项目(kfj20150609); 中央高校基本科研业务费专项资金项目

作者简介: 闻良生(1992-), 男, 硕士, 从事辐射探测成像与核仪器研发; wenliangsheng@nuaa.edu.cn.

通信作者: 汤晓斌(1978-), 男, 副教授, 从事核能与核技术工程研究; tangxiaobin@nuaa.edu.cn.

(TD)探测器测量所获得的能谱数据、剂量率数据以及 GPS 数据一并发送至 PC 主板进行能谱-剂量率转换^[10]、数据打包等处理,经过处理的数据会通过无线传输模块发送至上位机,上位机获取数据后对数据进行进一步分析。最后,操作人员可通过终端可视化软件得到能谱、剂量率、位置等信息。表 1 为该系统的各项性能参数。

表 1 机载辐射监测系统的各项性能参数

Table 1 Performance parameters of airborne radiation monitoring system

performance indicators	dose rate range/ $(\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1})$	energy range/keV	duration of flight/min	weight/kg	operating temperature/ $^{\circ}\text{C}$	controlled distance/km
technical parameters	$0.1 \sim 10^5$	40~3000	about 30	≤ 14	-5~45	≥ 2

2 系统设计要点

2.1 飞行平台的搭建

小型旋翼机作为整套监测系统的飞行平台,其必须具备良好的机械性能,足够的载重能力,确保整套系统能够正常工作。根据以上的设计要求,最终选用了一款八旋翼无人机作为搭载平台,该旋翼机具有以下优点:(1)采用八旋翼设计,配合其高速电机,可以提供充足的动力且飞行更加平稳;(2)机架均采用碳纤维结构,在保证较低自重的同时保证了较高的结构强度;(3)具有较强的可拆卸性,方便后期的改进与维修。

由于探测单元中各种设备的重量差别较大,为了防止因下端探测设备的重心偏移导致旋翼机飞行不稳,也为了避免各模块之间可能造成的相互干扰,利用 solidworks 软件对下端探测单元内的设备摆放进行了优化设计,设计图如图 2 所示。

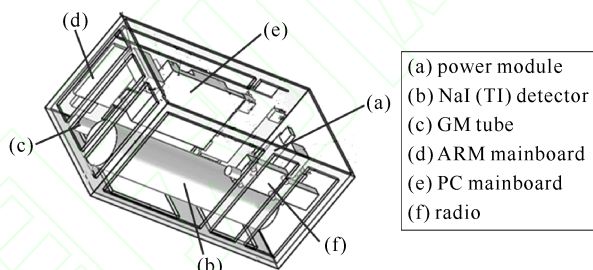


Fig. 2 Internal design of detection unit

图 2 探测单元内部设备摆放设计

2.2 系统关键模块设计

2.2.1 电源模块设计

整套系统采用的是单一 5 V 直流供电,但探测单元中各种设备所需工作电压不一,因此,就需要制备出可以用于高低直流电压转换的电源模块^[11]。需要进行电压转换的设备主要有:PC 主板的 12 V 供电,无线电台的 5.5 V 供电以及嵌入式主板的 3.3 V 供电。

图 3(a)为基本的 DC/DC 升压电路原理图,即利用电感的电流保持特性及电容的储能特性,用芯片控制 MOS 管的高频通断来给电容反复充放电,最终实现升压功能。图 3(b)为本系统中 5 V 升 12 V 电路的原理图,该 DC/DC 升压电路选用 TI 公司生产的 LM3478 作为升压控制芯片,该芯片具有 2.97~40 V 的宽输入电压范围,时钟频率在 100 kHz~1 MHz 可调,自带过压、过流保护功能。该芯片在输入电压 $V_{in}=5\text{ V}$ 、输出电压 $V_{out}=12\text{ V}$ 、输出电流 $I_{out}=1\text{ A}$ 的情况下,转换效率在 85% 以上。

如图 3(b)所示,1 脚为电流采样引脚,通过一个外接电阻 R 可以将电流信号转换为电压信号,电压信号再接入芯片内部,实现对电流的实时监测,起到过流保护的作用。3 脚为反馈引脚,该引脚内部参考电压为定值 1.26 V,输出端的反馈电阻相连,只需改变反馈电阻的大小就可以对输出电压 V_{out} 进行调节,具体关系式为

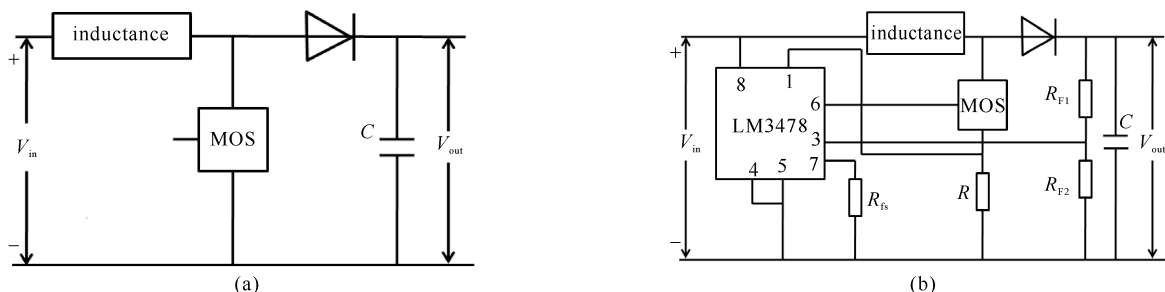


Fig. 3 Schematic of DC/DC boost circuit

图 3 DC/DC 升压电路原理图

$$1.26 V = V_{out} R_{F2} / (R_{F1} + R_{F2}) \tag{1}$$

7脚为频率调节引脚,芯片的工作频率可以通过改变该引脚上的电阻进行调节,具体关系为

$$R_{fs} = 4.503 \times 10^{11} f_s^{-1.26} \tag{2}$$

式中: R_{fs} 为调频电阻, f_s 为工作频率。作为开关电源电路中的重要元器件,电感 L 的选取很重要,若电感值过小,则电感电流的变化量会很大,从而导致每个周期都有一段电感上的电流为零,系统会工作在非连续模式下,导致系统纹波系数变大,性能变坏,为了避免这种情况,应当满足

$$\Delta i_L = DT \frac{V_{in}}{L} \leq 2I_{avg} \tag{3}$$

$$I_{avg} = \frac{V_{out}}{V_{in} \eta} I_{out} \tag{4}$$

式中: Δi_L 为电感电流的峰-峰值; T 为开关周期; D 为开关闭合时间与周期之比; I_{avg} 为平均电流值; η 为能量转换效率。将式(3)代入式(4)得到

$$L \geq \frac{\eta V_{in}^2 (V_{out} - V_{in})}{2V_{out}^2 f_s I_{out}} \tag{5}$$

以 $V_{in} = 5 V$, $V_{out} = 12 V$ 升压电路为例,取 $\eta = 0.85$, $R_{fs} = 26.7 k\Omega$, $I_{out} = 1 A$,代入式(5)可得 $L \geq 1 \mu H$,考虑留有一定的余量,电感一般取这个最小值的3~5倍。确定电感值 L 的同时,还要根据流过电感的电流峰值的大小,选择具有足够大磁芯体积的电感,否则将会出现电感饱和现象,导致电路故障。

为了减小纹波的干扰,在电路的输入输出端都用陶瓷贴片电容进行了滤波处理。此外,为了避免人为操作失误而将电源正负极反接烧坏元器件,在电源板总电源输入端还专门设计了防反电路。

2.2.2 嵌入式模块设计

嵌入式模块主要用来给GM计数管提供高压,控制GM管、GPS数据的实时采集与发送。如图4所示,该模块的电路包含模拟和数字两个部分,模拟部分主要是一个5V向500V的直流高压转换,数字部分控制GM管和GPS数据的实时采集与发送。图4实线框内为模拟高压部分,由于GM管的供电电压较高,而电流只有mA级,根据电路特点,该DC/DC升压电路的控制芯片选用了MAXIM公司推出的MAX641,这款芯片非常适用于高电压低电流电路,转换效率理论上高于80%。升压电路工作原理也是利用电感、电容的储能特性,通过芯片控制MOS管的高频通断最终实现升压功能,输出电压可通过改变FB端反馈电阻 R_{FB} 的阻值来调节。MOS管作为电路通断的开关,它的选型十分重要,所选型号必须具有足够的耐压值和开关频率。为了消除低频干扰对输出电压的影响,在电压输出端添加了RC高通滤波器进行滤波处理。由于电路中存在高频电压,为了防止高频电压对低压及数字部分产生干扰,在进行PCB板布局时对高压部分进行了隔离处理。

图4虚线框内为该电路的数字部分,选用LPC1549芯片作为微控制器,该款芯片采用Cortex-M3内核,支持2.4~3.6V的单电源供电。通过向控制器内烧入编写的嵌入式程序,实时控制GM管、GPS数据的接收与发送,再通过MAX3232收发器进行电平的转换,随后发送至PC主板进行数据处理。鉴于微控制器对电压纹波要求较高,为保证其正常工作,尽可能减少纹波的干扰,所以没有用上述电源模块直接进行电压的转换得到3.3V的电压,而是选择在嵌入式主板上单独转换。

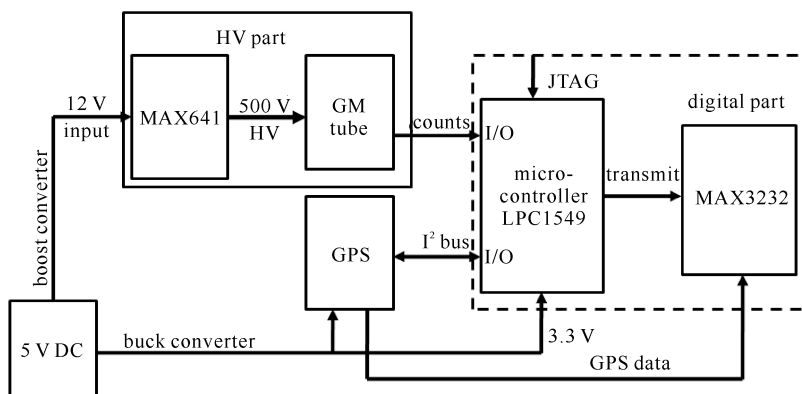


Fig. 4 Principle block diagram of embedded module

图4 嵌入式模块原理框图

GM 管信号采集电路作为硬件设计的重要部分,本文通过使用一个 NPN 型三极管作为开关,实现对 GM 管脉冲信号的采集。工作原理如下:在没有核脉冲信号时,三极管集电极处于 3.3 V 的高电平,微处理器 I/O 口与三极管集电极相连,也保持高电平状态。当 GM 管记录到核脉冲信号时,三极管基极上就会产生一个如图 5(a)所示的正电压脉冲,使得 $V_{be} > 0$,三极管导通。此时,微处理器与三极管集电极相连的 I/O 端口监测到一个低电平,总计数加一。图 5(b)所示为三极管进行了两次通断,在集电极产生的电压脉冲波形,说明这个时间段内 GM 管记录到了两个核脉冲信号。

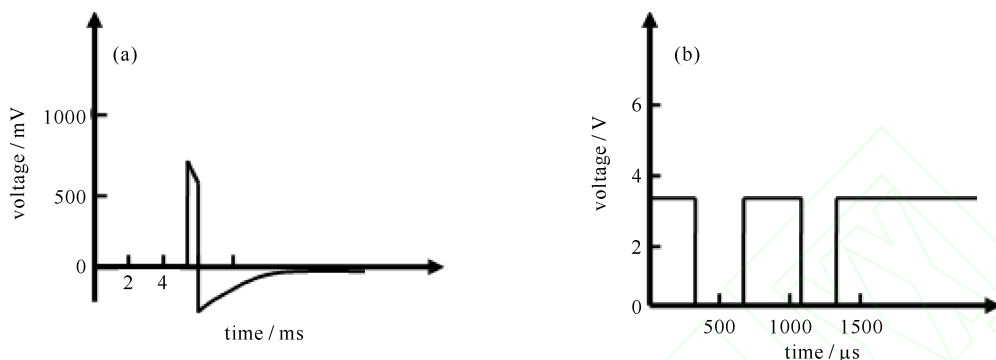


Fig. 5 Voltage pulse waveforms of transistor

图 5 三极管各极电压脉冲波形

2.3 系统剂量率响应线性范围的测定

为了拓宽系统的剂量率测量量程,本监测系统采用了双探测器工作模式,通过 NaI(Tl)探测器与 GM 计数管的自动切换来实现不同剂量率场下的准确测量,这是该系统的一大亮点,同时也是设计的重点。为了确定系统的剂量率测量范围以及最佳的探测器切换阈值,必须先测定两种探测器各自的剂量率响应线性范围。通过在江苏省计量院的标准剂量率场下的实际测量,最终通过 origin 拟合得到了如图 6 所示的剂量率响应曲线。由图 6(a)可以发现 NaI(Tl)探测器在 $0.01 \sim 120 \mu\text{Gy/h}$ 的范围内,剂量率响应曲线的线性较好,高于 $120 \mu\text{Gy/h}$ 部分由于探测器发生堵死,曲线弯曲严重,曲线的线性较差,因此高于 $120 \mu\text{Gy/h}$ 的部分利用 NaI(Tl)探测器的能谱转换得到剂量率的方法失效,只能切换至 GM 管进行测量。GM 管厂商提供的线性范围为 $1 \mu\text{Gy/h} \sim 100 \text{mGy/h}$,以此作为参考,为了验证由 GM 管的计数率推算出剂量率这种方法的可行性,进行了实验测量。由于实验条件的限制,只对 $400 \mu\text{Gy/h}$ 以下进行了实际测量,得到图 6(b)所示的 GM 管剂量率响应曲线,由图可以发现在 $1 \sim 400 \mu\text{Gy/h}$ 范围内曲线的线性较好,根据 GM 管在其量程范围内剂量率与计数率保持线性这一特性,可以推出 $400 \mu\text{Gy/h}$ 以上的剂量率响应曲线的线性情况。结合以上实验结果,为保证整套系统剂量率测量的准确性,故可将切换阈值设置在 $100 \mu\text{Gy/h}$ 左右,在 $100 \mu\text{Gy/h}$ 以下使用 NaI(Tl)探测器测量,超过 $100 \mu\text{Gy/h}$ 自动切换至 GM 管测量。

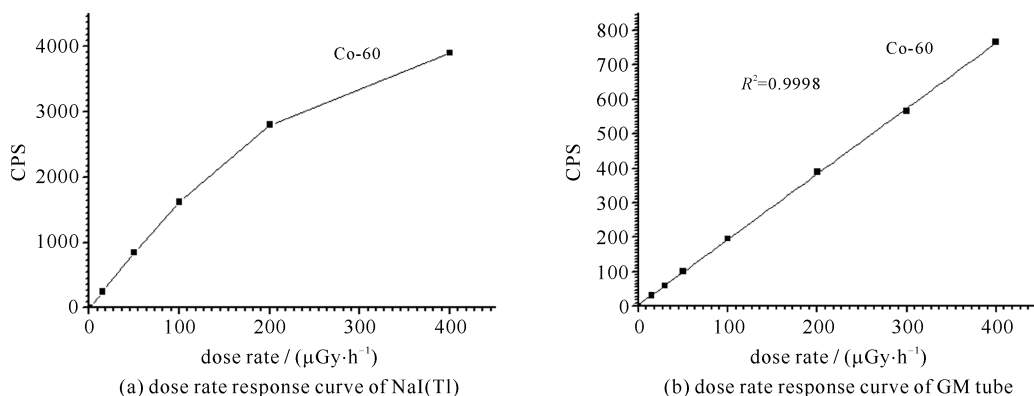


Fig. 6 Dose rate response curve of detectors

图 6 探测器剂量率响应曲线

2.4 软件设计

软件设计主要包含嵌入式程序、下位机数据处理软件和上位机界面软件。嵌入式程序通过 C 语言编写完成,主要实现对 GM 管和 GPS 数据采集、发送过程的控制。下位机软件主要完成对剂量率、能谱以及定位数据

的采集、处理与发送,其数据处理流程如图 7 所示,经过软件处理后的数据将通过无线电台发送至上位机。上位机软件主要实现能谱、剂量率数据的实时显示,通过结合数字化地图,可将飞行轨迹在地图上实时显示。一旦剂量率超出警报阈值,软件界面将会出现警报信息。

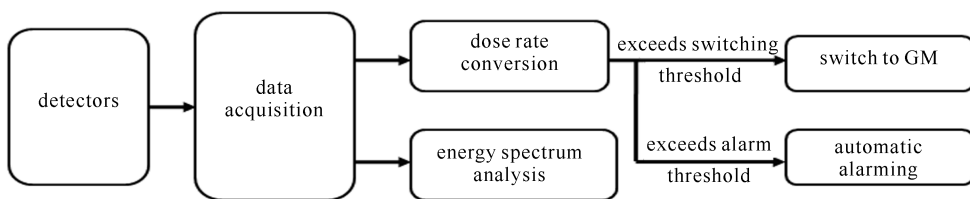


Fig. 7 Data processing flow of lower computer system software

图 7 下位机软件数据处理流程

3 最小可探测活度计算

系统的探测灵敏度作为衡量系统性能的重要指标之一,对实际探测过程中飞行高度、飞行速度以及探测时间等参数的设置具有重要的参考意义。为了先从理论上直观地了解该辐射监测系统的探测灵敏度,选取最小可探测活度(MDA)来表征辐射监测系统探测灵敏度。MDA 值的大小与源种类、探测器种类、尺寸以及探测时间等因素有关,表示在已知源种类、测量时间、探测距离等条件下,探测器所能测到的最小源活度。这里使用了 MCNP5 软件对 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的 NaI(Tl) 探测器在不同距离条件下的探测进行了模拟,根据探测器实际尺寸所建探头模型如图 8 所示,建模过程中将探头的铝包壳、反射层等均考虑在内。

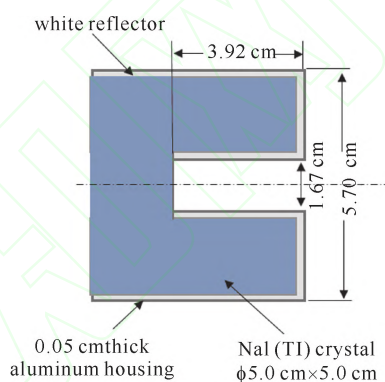


Fig. 8 Model of NaI(Tl)

图 8 NaI(Tl) 探头模型

放射源种类选择了 Am-241, Cs-137, I-131, Ir-192 和 Co-60 五种放射源。将这五种放射源设为点源进行模拟,每次模拟所设置的测量时间为 10 s。将模拟计算所得数据整理代入如下的 MDA 计算公式

$$\sigma_{\text{MDA}} = \frac{2.71 + 4.65\sqrt{B}}{T_L \rho \epsilon} \quad (6)$$

式中:MDA 值(σ_{MDA})的单位为 Bq;B 为环境本底;T_L 为测量时间; ρ 为 γ 射线的发射概率; ϵ 为源峰探测效率。环境本底 B 可由实际测量得到, ϵ 由全能峰内的计数与源发射的总粒子数之比得到,具体的理论计算结果如表 2 所示。

表 2 不同条件下 MDA 值计算结果
Table 2 MDA of different conditions

source distance /m	$\sigma_{\text{MDA}}/\text{Bq}$					
	Am-241 (0.059 MeV)	Cs-137 (0.662 MeV)	I-131 (0.364 MeV)	Ir-192 (0.355 MeV)	Co-60 (1.17 MeV)	Co-60 (1.33 MeV)
0.5	4.46×10^4	1.81×10^4	1.55×10^4	1.59×10^4	3.69×10^4	4.07×10^4
1	1.8×10^5	7.03×10^4	5.97×10^4	6.09×10^4	1.41×10^5	1.56×10^5
5	4.38×10^6	1.73×10^6	1.51×10^6	1.53×10^6	3.52×10^6	3.75×10^6
10	1.67×10^7	7.11×10^6	6.26×10^6	6.55×10^6	1.42×10^7	1.51×10^7

4 系统测试

系统测试主要分为三大部分:关键模块调试、剂量率测量准确性测试以及飞行实测。关键模块调试主要是对电源模块以及嵌入式模块的调试,电源模块主要从电压、转换效率以及稳定性等几个方面进行调试。为了测试电路的负载能力,调试过程中通过在输出端外接不同阻值的水泥电阻来测量其输出电压,可得出实际输出功率W_o;由于输入电压、电流已知,可算出输入功率W_i;由W_o/W_i即可得到转换效率。嵌入式模块调试涉及

硬件和软件两部分,需要将写好的程序烧入控制芯片进行调试。调试过程中出现过芯片上电无法自动复位的问题,经过仔细排查发现是硬件电路中的阻容复位电路出现问题,随后将原来的阻容复位替换为利用芯片进行复位,解决了这一问题。

2.3 节中对系统剂量率响应曲线的线性范围进行了测定,并且确定了两种探测器的切换阈值。为了测试系统剂量率测量的准确性,将该系统的测量结果与同条件下标准电离室的测量结果对比,结果如表 3 所示,可以发现系统在 $0.01 \sim 400 \mu\text{Gy}/\text{h}$ 的范围内的测量误差均较小,说明系统对剂量率的测量具有较好的准确性。根据 GM 管在其 $1 \mu\text{Gy}/\text{h} \sim 100 \text{mGy}/\text{h}$ 的测量范围内剂量率响应曲线保持良好线性这一特性,再结合表中 6~9 号的实验结果,即可推出 $400 \mu\text{Gy}/\text{h}$ 以上 GM 管测量的误差情况,可知系统可以对 $400 \mu\text{Gy}/\text{h}$ 以上部分进行测量。

表 3 系统实测剂量率与标准辐射剂量对比

Table 3 Comparison of system measured dose rate and standard dose rate

No.	standard dose rate/ $(\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1})$	measured dose rate/ $(\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1})$	error/%
1	0.08	0.082	2.5
2	0.4	0.416	1.5
3	1.5	1.524	1.6
4	5.0	5.152	1.4
5	15	14.232	5.1
6	50	47.856	4.4
7	100	105.707	5.7
8	200	206.126	3.1
9	400	421.158	5.3

飞行实测就是将探测模块、电源模块以及通信模块等全部搭载于无人旋翼机上进行户外实际探测,主要测试整套系统所有硬件以及软件的性能。飞行实测前,利用蒙特卡罗软件模拟不同源活度、能量条件下的最小可探测距离,确定最佳的飞行高度以及飞行速度。为了测试系统的性能,在户外进行了飞行实测,实测选用了两枚 10^4Bq 量级的 Cs-137 和 Co-60 放射源作为目标源。根据 MCNP5 模拟所得到的不同条件下的最小可探测活度值,结合实际所测放射源的活度,最终确定以 2 m 的飞行高度按照预先设定的路径对放射源进行搜寻,过程中每隔 5 m 做一次 5~8 s 的悬停测量。图 9 所示为系统的飞行实物图,探测过程中某一时刻的上位机软件界面如图 10 所示,此时界面上实时显示飞行轨迹,各探测点剂量率和能谱等信息。



Fig. 9 Image of airborne radiation monitoring system

图 9 机载辐射监测系统实物图

发现放射源后,探测系统将在目标上空悬停,悬停测量几十 s,会发现较为明显的目标核素能谱峰形。图 11

发现放射源后,探测系统将在目标上空悬停,悬停测量几十 s,会发现较为明显的目标核素能谱峰形。图 11



Fig. 10 Interface of host computer PC software

图 10 上位机软件界面

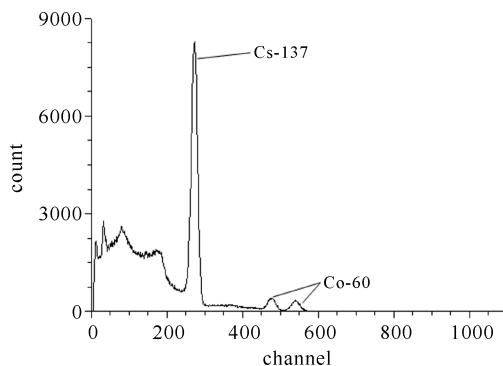


Fig. 11 Measured spectrum

图 11 实测能谱

为根据实测所得的能谱数据,利用 origin 绘图软件进行处理,得到的 Cs-137(0.662 MeV)和 Co-60(1.17 MeV,1.33 MeV)能谱图,从谱图中可以清晰地辨别出两种核素所对应的峰位置。

5 讨论与总结

本文介绍了用于辐射环境监测和放射源搜寻的机载辐射监测系统,介绍了其结构和原理,同时从理论和实验两个方面验证其设计的合理性与科学性,该小型旋翼机机载环境辐射监测系统具有以下特点:

(1) 该监测系统将小型旋翼机与传统的核辐射探测设备相结合,再通过核数据处理技术、GPS 定位以及无线通信等技术,可以实现远距离操控,对目标区域进行实时定点式测量,避免工作人员长时间近距离地接触放射源所受到的辐射损伤,有效克服了复杂地形环境对探测带来的困难。

(2) 系统同时采用了 GM 管和 NaI(Tl)探测器两种核辐射探测设备,可以同时实现剂量率和能谱测量。此外,通过能谱-剂量率转化软件有效拓宽了整套系统的剂量率测量范围。

(3) 系统具有报警功能,实际探测中剂量率一旦超过预先设定的阈值,上位机软件界面就会显示报警信息。

(4) 系统将数字化地图和核探测技术相结合,不仅可以实时获取各个探测点的剂量率数据,还可以显示探测路径,实现了对放射源的精确定位,提高了系统的工作效率。

目前,该系统已通过各项功能测试,具备核辐射监测能力,达到了最初的目的。相信随着旋翼机技术的不断发展,可选用具有更大负载能力、更长续航时间的旋翼机作为载体,搭载更多的探测设备,实现更多的功能。基于小型旋翼机的机载辐射监测系统作为一种新型核辐射探测设备,在辐射环境监测以及失控 γ 放射源搜寻方面具有重要意义。

参考文献:

- [1] Nilsson J, 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.
- [2] 袁之伦, 李宏宇, 唐丽丽, 等. 车载辐射环境巡测技术应用的探讨[J]. *环境监测管理与技术*, 2013, **25**(6): 52-56. (Yuan Zhilun, Li Hongyu, Tang Lili, et al. Discussion on the application of vehicle radiation monitoring technology. *Ministry of Environmental Protection*, 2013, **25**(6): 52-56)
- [3] 王红艳, 刘森林, 潘大金. 车载式 NaI(Tl)大晶体组的多道谱仪[J]. *原子能科学技术*, 2004, **38**: 251-254. (Wang Hongyan, Liu Senlin, Pan Dajin. A vehicle-based NaI(Tl) multiple channel spectrometer. *Atomic Energy Science and Technology*, 2004, **38**: 251-254)
- [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] Pöllänen R, Toivonen H, Peräjärvi K, et al. Radiation surveillance using an unmanned aerial vehicle[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2009, **67**: 340-344.
- [6] Tang Xiaobin, Meng Jia, Wang Peng, et al. Efficiency calibration and minimum detectable activity concentration of a real-time UAV airborne sensor system with two gamma spectrometers[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2016, **110**: 100-108.
- [7] Barsanti M, Conte F, Delbono I, et al. Environmental radioactivity analyses in Italy following the Fukushima Dai-ichi nuclear accident[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2012, **114**: 126-130.
- [8] Schöppner M, Plastino W, Povinec P, et al. Estimation of the radioactive source dispersion from Fukushima nuclear power plant accident [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2013, **81**: 358-361.
- [9] 王南萍, 裴少英, 黄英, 等. 环境 γ 能谱测量方法研究及应用[J]. *辐射防护*, 2005, **25**(6): 347-356. (Wang Nanping, Pei Shaoying, Huang Ying, et al. Research on and application of methods for gamma-ray spectrometry in environmental monitoring. *Radiation Protection*, 2005, **25**(6): 347-356)
- [10] 赖万昌, 刘艳芳, 唐丽丽, 等. 用 G(E)函数法计算 γ 射线空气吸收剂量率[J]. *核技术*, 2011, **34**(9): 679-683. (Lai Wanchang, Liu Yanfang, Tang Lili, et al. Determination of air dose rate of γ -rays by using G(E) function method. *Nuclear Techniques*, 2011, **34**(9): 679-683)
- [11] 苟静. BUCK 型 DC-DC 中关键电路的研究与设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2014: 8-16. (Gou Jing. Research and design for buck DC-DC critical circuits. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014: 8-16)

Design and implementation of minitype rotorcraft airborne radiation monitoring system

Wen Liangsheng¹, Gong Pin^{1,2}, Huang Xi¹, Wang Peng¹, Tang Xiaobin^{1,2}, 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: With excellent mobility and environmental suitability of minitype rotorcraft, which is combined with traditional nuclear radiation detection equipments, a set of airborne radiation monitoring system was implemented by development of hardware and software, application of wireless communication, GPS and nuclear data processing technology. The terrain environmental impact on system can be ignored, and radiation damage to workers can also be avoided well. This paper introduces the configuration, operating principle and several key technical difficulties of the airborne radiation monitoring system, the design of key modules and measurement of dose rate response linear range are described comprehensively. The test result shows that the system can give a real-time and accurate detection on the radiation of environment, which can be used for daily environmental radiation monitoring or searching for lost or orphan gamma ray sources. A new method for nuclear accidents emergency is provided.

Key words: minitype rotorcraft; real-time; radiation monitoring; searching for gamma ray sources; nuclear emergency

PACS: 29.25.Rm; 29.30.Lw; 29.40.Gx; 29.40.-n