

一种核应急用 γ 相机的灵敏度测量和分析

宋凤军¹, 雷家荣¹, 曹文², 李忠宝¹, 谢红卫¹

(1. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川绵阳 621900;

2. 西南科技大学信息工程学院, 四川绵阳 621000)

摘要:研制了一种用于核应急领域的 γ 相机, 测量和分析了该相机的本底计数特性, 利用放射源研究了不同剂量率下探测器的计数分布, 采用移动平均检测法分析了相机的误报率和准确率, 给出了探测器能够探测到的剂量率下限和角分辨能力, 实验结果表明新研制的 γ 相机灵敏度高、成像时间短, 比较适合核应急现场使用。

关键词:核应急; γ 相机; 报警判据

中图分类号: O 571.33, TL 75 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-0934(2012)03-0333-04

核应急是指为了控制或缓解核事故、减轻核事故后果而采取的不同于正常秩序或正常工作程序的紧急行动^[1]。高灵敏度远距离 γ 相机是一种被动式 γ 相机, 主要用来判定核突发事件污染区的位置、污染面积和污染程度, 在核应急、国家安全、军控核查、反恐、核退役、放射医学等方面有着广泛的应用^[1-6]。放射性物质监控门是用来探测人或车辆是否携带放射性违禁物品的设备^[2], 需要人或车辆通过该门, 才能够进行检测。与普通的放射性物质监控门不同, 高灵敏度远距离 γ 相机不仅能够探测有无放射性物质存在, 还能够成像, 可以在数百米外监控人员或车辆是否携带放射性物质, 因此这种相机有其独特的应用领域, 例如持有放射源的单位因火灾或地震诱发房屋倒塌而无法判定放射源位置时, 可以使用高灵敏度 γ 相机搜寻放射源; 核电站反应堆泄露条件下可以使用 γ 相机判断污染区位置、分布和污染程度, 给应急救援和去污处理人员提供相关信息^[5]; 大型体

育场馆和公众场所被脏弹袭击后, 需要对污染区定位, 以便进行去污处理。

核应急使用的 γ 相机由可见光相机、 γ 探测器、激光测距仪、数据采集和图像合成软件组成的一个系统, 如图 1(a) 所示。先使用位置灵敏 γ 探测器和可见光相机分别获得 γ 图像和可见光图像, 再利用激光测距仪获得被检测目标到 γ 相机的距离, 根据物像比关系计算出准确的 γ 射线源位置和尺寸。最后利用图像合成软件将可见光图像与 γ 图像合并, 获得被寻找 γ 射线源的位置信息, 如图 1(b) 所示。 γ 探测器是 γ 相机的核心器件, 它的灵敏度决定了相机的整体性能。

1 位置灵敏 γ 探测器构成

γ 探测器基于小孔成像原理, 主要由 3 部分组成: 小孔成像部分、闪烁阵列、位置灵敏光电倍增管, 如图 1 所示。我们采用的 H8500 型位置灵敏光电倍增管, 具有 64 个阳极; 使用 64 块 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的镀膜 Ce:YAP 晶体构成闪烁阵列。每块晶体对应 H8500 型位置灵敏光电倍增管的一个阳极, 并与其构成整个位置灵敏 γ 探测器的一个像元, 共 64 个像元。

收稿日期: 2011-10-18

作者简介: 宋凤军(1978-), 男, 助理研究员, 硕士研究生, 主要从事辐射成像技术和惯性约束聚变研究。

被寻找的 γ 源通过小孔成像到闪烁阵列上(如图 2 所示),闪烁阵列将 γ 射线转化为可见光,对应的光电倍增管的阳极输出的脉冲计数率随

之发生变化,每个阳极输出的脉冲计数率反映了对应位置的 γ 射线强度信息^[6]。

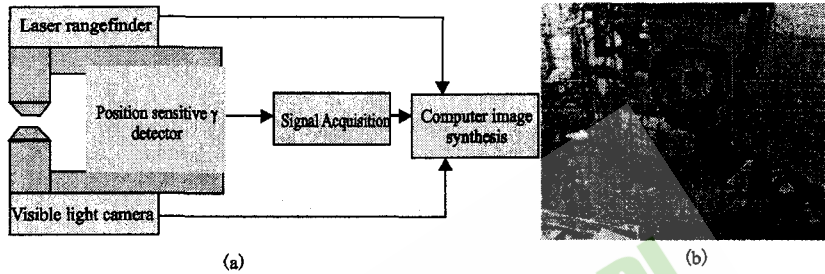


图 1 核应急 γ 相机结构示意图

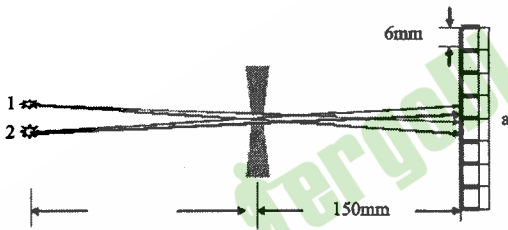


图 2 γ 成像示意图

2 实验方法

核应急领域关心的是探测器能够探测到的剂量率下限值,该值越小表明探测器灵敏度越高。位置灵敏 γ 探测器单像元能够探测到的剂量率下限值反应了探测器整体的灵敏度。放射性监控仪器根据辐射场强度变化量的大小给出报警信号,一般将探测器当前计数与本底计数进行比较,当两者的差值超过一定的范围,就给出报警信号^[2]。将放射源置于不同的距离,在探测器单像元上注入的剂量率不同,测量探测器单像元能够识别 $1 \mu\text{Ci}$ 的 ^{137}Cs 放射源的最远距离,就可以计算出探测器单像元能够探测到的剂量率下限值。测量位置灵敏 γ 探测器单个像元的灵敏度,需要测量无放射源条件下本底计数和有放射源存在条件下脉冲输出计数,通过比较分析来判断能够探测到的剂量率下限值。

实验采用定标器记录位置灵敏 γ 探测器单个像元输出的脉冲个数,记录时间 1 分钟/次。本底测量重复进行了 100 次,计数如图 3 所示。使用 $1 \mu\text{Ci}$ 的 ^{137}Cs 放射源,分别测量了放射源置于距离闪烁阵列 2、20、30 cm 处,位置灵敏 γ 探测器的单个像元的输出电脉冲计数。

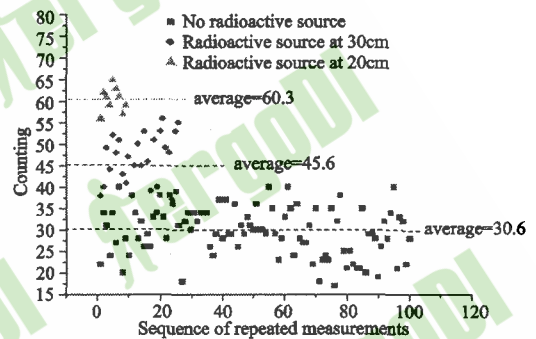


图 3 探测器输出脉冲计数统计

以探测器的中心所在位置为轴心,改变放射源的位置,分别测量半小时,取各像元每分钟的计数平均值,研究探测器的角分辨能力。

3 实验分析

本底测量进行了 100 次。每次记录的脉冲个数可以被看作离散型随机变量 X , 100 次测量的平均值 $E(X)$ 称为 X 的数学期望, $E(X) = 30.6$; 随机变量 X 与平均值 $E(X)$ 的偏差 $|X - E(X)|$ 反映了随机变量 X 与它的平均值的偏离程度。放射性衰变随机事件符合泊松分布规律,当 $E(X) \geq 20$ 时,泊松分布近似为高斯分布,即正态分布^[7]。对本底测量的偏差 $|X - E(X)|$ 和其分布率进行高斯拟合,结果表明,本底计数的偏差 $|X - E(X)|$ 符合高斯分布规律,如图 4 所示,因此可以采用正态分布的一些分析手段来判断有无放射性物质存在^[3]。

放射源置于距离闪烁阵列 2 cm 时,测量了 10 次,平均值为 341.2,计数全部大于 300; 距离 20 cm 时,测量了 10 次,平均值为 60.3,计数全部大于 50。当放射源距离闪烁阵列小于 20 cm 时,计数的最小值明显高于本底计数的最大

值,如图3所示,通过简单的比较电路设计就能够识别放射源的存在。放射源置于30 cm处时,输出电脉冲计数的平均值高于本底计数的平均值,但是计数的最小值小于本底的最大值,如图3所示,采用简单的数值比较无法识别,此时需要采用统计规律进行分析,才能够识别放射源的存在。

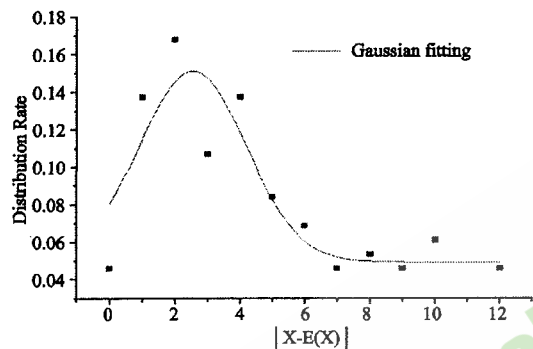


图4 本底方差分布规律

放射性监控仪器根据辐射场强度变化量的大小给出报警信号,一般将探测器当前计数与本底计数进行比较,当两者的差值超过一定的范围,就给出报警信号。放射性监控仪器将辐射测量数据代入特定的关系式,根据关系式成立与否,判断是否有放射性物质存在,此关系式称为报警判据^[3]。

常用的有两种判据表达式:

$$N_i - \bar{N}_i - K \sqrt{N_i} \geq 0 \quad (1)$$

$$\frac{N_i + N_{i+1} + N_{i+2}}{3} - \bar{N}_i - K \sqrt{N} \geq 0 \quad (2)$$

式中: N_i 为第 i 排节的计数; \bar{N}_i 为当前本底计数的期望值; K 为报警阈。方程(1)大于0成立,称为连续成立法(报警判据 I)。方程(2)大于0成立,称为移动平均检测法(报警判据 II)。本底计数的偏差符合正态分布,根据正态分布特性,分析了这两种报警判据的误报率,如表1所示。

表1 两种报警判据在不同的报警阈下的误报率

报警阈值 K	误报率	
	报警判据 I	报警判据 II
1.5	0.00446	0.0047
1.75	0.00161	0.0005
2.0	0.00052	0.0000

放射源置于30 cm处时,测量输出脉冲计数 N_i 重复进行26次,每次记录时间1 min。 \bar{N}_i 即为无放射源时本底平均值 $E(X) = 30.6$, 将

有放射源存在时探测器输出脉冲计数 N_i 代入报警判据表达式(1)和(2),表达式大于0时称为报警,小于0时称为漏报。由于报警判据 I 误报率略高,我们采用报警判据 II 进行了数据分析, K 取值为1.75和2,报警26次,漏报0次,准确率100%,如图5所示。

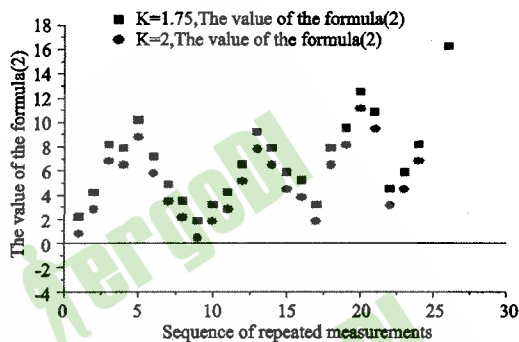


图5 报警判据 II

将放射源的位置由位置1旋转到位置2时,探测器靠近中心的一排八个像元的计数平均值如图6所示。

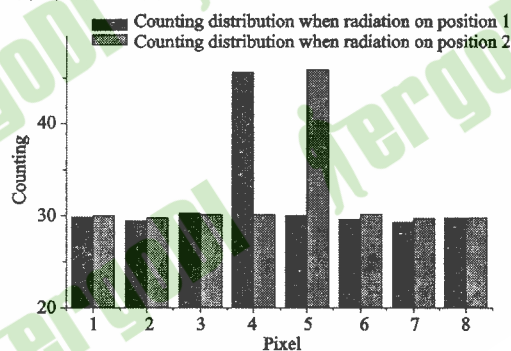


图6 不同入射角度时的计数分部

此时,位置1和位置2与探测器中心点 a 的夹角为1.15度,表明探测器角分辨能力约为1.15度。

4 结论

测量结果表明这种 γ 相机单像元能够识别30 cm处 $1 \mu\text{Ci}$ 微居的 ^{137}Cs 放射源,同时也表明该 γ 相机能对30 cm处的 $1 \mu\text{Ci}$ 的点 ^{137}Cs 放射源成像,角分辨能力约为1.15度。

参考文献:

- [1] 谢朝阳, 罗景润, 郭历伦. 核事故应急后果评价系统研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(4): 160 - 164.
- [2] 储诚胜, 黄瑞良, 刘晓亚, 等. 核监控过程中虚警率的研究[J]. 核技术, 2006, 29(5): 392 - 395.

- [3] 韩子杰, 亢武, 储诚胜, 等. 报警判据、灵敏度和虚警率研究[C]. 2007年全国核仪器应用核探测技术核测量方法学术会议论文集, 2007.
- [4] 房宗良, 张圉世, 曹剑锋, 等. PET用闪烁晶体[C]. 全国核电子学与核探测技术学术年会论文集, 2004.
- [5] 康慧. 核事故应急介绍[J]. 中国核电, 2010, 3(2): 180 - 185.
- [6] Liu Huafeng, Bao Chao. 用于高分辨率 PET 探测器的 LSO 闪烁晶体的研究[J]. 光子学报, 2000, 29(5): 449 - 453.
- [7] 汲长松. 核辐射探测器及其实验技术手册[M]. 北京: 原子能出版社, 1990.

Measured and Analyzed the Sensitivity of A Nuclear Emergency

SONG Feng - jun¹, LEI Jia - rong¹, CAO Wen², LI Zhong - bao¹, XIE Hong - wei¹

(1. Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, 621900,
2. College of Information Engineering of Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000)

Abstract: We developed a new position - sensitive γ - detector for nuclear accident, measured and analyzed it's characteristic, analyzed the counter - region changes with the dosage of γ - radiation can be detected, compared with the similar production of Canberra company, the result indicates that the new developed γ - camera have a good delicacy.

Key words: nuclear emergency response, γ - camera, alarm principle

(上接第 310 页, Continued from page 310)

A Smoothing Effect Evaluation Method of γ Spectrum

LEI Wei - guo^{1,2}, WANG Tie - shan¹, FENG Tian - cheng², JIA Ming - yan²,
CHENG Zhi - wei², LEI Zhen²

(1. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China,
2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: In most situations, a smooth method is needed in γ spectrum analysis to reduce the noise. It is necessary to compare the different smooth method to get the best one and optimize the parameters. The paper gave an evaluation method of γ spectrum smooth method, and calculated the equivalent measuring time of the smooth effect. The method was used to optimize the smooth method in smoothing measurement spectrum. The result shows that the method is useful in comparing different smooth methods and finding the best one to raise the precision and accuracy of analysis of γ spectrum.

Key words: γ spectrum analysis, smooth method, evaluation method, polynomial fitting, least square method