

人员出入口核材料放射性监测装置的研制

黄德宝, 张文良, 吕 钊, 张晓红,
赵荣生, 刘大鸣, 李纪民, 佟伯庭

(中国原子能科学研究院 放射化学研究所, 北京 102413)

摘要:采用 射线探测器阵列和序贯概率比检验法建立了人员出入口核材料放射性监测装置, 以检测通过出入口的人员是否以隐蔽方式非法携带核材料或其它放射性物质。

关键词:核保障; 出入口; 核材料监测装置

中图分类号: TL812⁺.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2000)05-0445-03

为对核设施、核材料实施成功的实物保护, 各核国家除在其核设施(核电站、核燃料生产厂、核燃料后处理厂、研究用核设施及核燃料储存点等)区域内配置各种防盗报警及电视监控系统外, 还在区域闭合周界的出入口处设置放射性监测装置, 对通过出入口的人员或车辆进行快速扫描检测, 以确保铀、钚等特种核材料(SNM)及其它放射性物质不被非法转移。

国外对通过出入口的人员或车辆是否携带特种核材料或其它放射性物质进行监测的研究工作开展得较早, 并有定型商品投入实际应用。美、英、法、德、意大利都已开发出各自不同类型的放射性监测装置, 并配置在本国核设施的实物保护系统及海关的出入口处^[1]。

我国对各核设施正在建立相应的实物保护系统, 有关技术研究工作刚刚起步。目前, 国内尚未开发放射性监测装置。因此, 及时开展有关这种监测技术的研究和应用, 对增强我国的核保障技术能力、遏制核废物非法流入我国、保护国家的自然环境极为必要。

1 装置

该监测装置采用 NaI(Tl) 闪烁体探测器(探头)阵列作为探测元件, 检测铀、钚等核材料或其它 辐射体放射出的 射线, 以确定这些 放射性物质的存在; 若与金属探测器联合使用, 还能检测受屏蔽的核材料或其它 放射性物质。

该装置为通行门型式, 外形尺寸为 2 300 mm × 1 740 mm × 360 mm, 通道尺寸为 2 000 mm × 740 mm。装置由如下 5 部分组成: 1) 探测室是通行门的壳体, 它保护其内部设备的安全及正常运行, 壳体内安装 NaI(Tl) 探头阵列、信号处理系统、数据处理及检测系统、报警系统; 2) 探头阵列由 14 只探头(ST101 型 $\phi 75$ mm × 50 mm NaI(Tl) 闪烁体和 GDB-76 型光电倍增管)组成, 采用 $\phi 90$ mm × 130 mm、厚度为 6 mm 的铅屏蔽层; 3) 信号处理系统由 4 台机箱组

收稿日期: 1999-06-15; 修回日期: 2000-03-06

作者简介: 黄德宝(1939—), 男, 安徽无为, 高级工程师, 工程物理专业

成,每台机箱内有4路信道(每路信道包括主放大器、单道分析器、高压直流电源、低压直流电源),可接收并处理14只探头的电信号;4)数据处理及检测系统是一多路定时计数器(包括整形电路、定时计数板、计算机、数字量输入/输出板、报警声音产生电路,均安装在计算机内),可接收4台机箱的共14路逻辑信号,由计算机的检测程序对其进行自动处理;5)报警系统接收数据处理系统输出的信息,转换成声光报警信号并以声(喇叭)、光(指示灯)提示。

2 检测方法

2.1 检测原理

SNM或其它放射性物质放射出的射线射入监测装置后被转换为逻辑脉冲(5 V/0.5 μ s)。在监测区域的同一地点,SNM或其它放射性材料的质量越大,监测装置的单道分析器输出的脉冲计数率越高。如果监测到的脉冲计数率比本底计数率有明显增加,则表明该区域可能存在SNM或其它放射性物质。

这种检测过程在存在辐射本底信号且本底水平不断变化的情况下连续进行,采用概率统计方法。若被监测区域内无干扰信号存在,则监测系统的报警阈值 $M = B + s$ 。式中: B 为平均本底计数率; s 为平均本底计数率的标准偏差; k 为置信系数,是本底涨落的倍数,通常取2~4。 k 值与监测系统的误报警概率及探测灵敏度有关: k 值设置得大,则误报警概率和探测灵敏度降低; k 值设置得小,则误报警概率和探测灵敏度增高。

当有SNM或其它放射性物质出现在监测区域时,监测装置检测到的射线计数率为: $G = B + S$ 。式中: G 为存在放射性物质时检测出的总计数率; S 为测到的放射性物质发出的射线净计数率。只有满足条件 $G > M$,才会发出报警信息。

2.2 检测步骤

未占位(无被监测对象进入通行门区域)时,系统持续检测并及时更新环境辐射本底的计数率,计算出平均本底计数率 B 及标准偏差 s 。计数时间间隔可任选(通常设定为0.2 s),共计数300次。占位(有被监测对象进入通行门区域)时,由通行门上的主动红外探头测定人员进入监测区的时刻,使监测系统自动进入检测阶段并执行检测功能,在设定的时间间隔内记录脉冲数,计算出相应的计数率并存储数据。

系统可任选以下一种检测方式对通行人员实施检测。1)等待式检测 令被监测人员站立通行门的中央地点,并停留30 s进行检测。若监测装置发出报警信号,则存疑,须作详查(通常用手持式射线探测器对可疑部位作近距离(2~5 cm)检测);若无报警信号,则可通行。此检测方式的灵敏度较高,但等待时间较长,不适合交通流量大的场合。2)直通式检测 被监测人员以正常步速(1.2 m/s)穿过通行门,检测迅速,适合交接班时使用,但灵敏度较低,且只能测量有限个数据,因此,数据处理方式不同,可采用数字滤波法、移动平均法、序贯概率比检测法中的任何一种。

序贯概率比检测法能对通行人员实施快速检测,其探测灵敏度与人员的通行速度有关,故规定人员穿过通行门时为正常步速。该装置采用序贯概率比检测法。

3 实验结果

3.1 探头屏蔽体的屏蔽效果

实验测定了14只探头的探测效率(探测器效率)、几何因子及其空间分布和坪特性。合理

地选定了窗口能量(60~450 keV)和设计了探头的屏蔽体。实验结果表明:无屏蔽时,14只探头的平均本底计数率 $B_b = 242.76 \text{ s}^{-1}$;采用屏蔽体(铅屏蔽层 $\phi 90 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$ 、厚 6 mm)后,14只探头的平均本底计数率 $B_a = 82.11 \text{ s}^{-1}$ 。 $B_a/B_b = 34\%$ 。

3.2 监测系统的误报警概率

对该监测系统的误报警概率 FAP(实测的误报警次数 n /总检测次数 N)进行了测试。实测中,选 $n = 4$, $N = 1.27 \times 10^5$, $n = 23$ 。所以, $FAP(\text{实测}) = 1.8 \times 10^{-4}$ (或 1/5 500)。

3.3 监测系统的探测灵敏度

国际上将这类监测装置的探测灵敏度定义为:在规定条件下(环境辐射本底为 $1.792 \times 10^{-12} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,探测概率 50%或 95%)监测装置能够检测到的最小核材料量(g,高浓度铀 HEU 或低燃耗钚 LBPU)。经实测,该监测装置的探测灵敏度为:

HEU, 1.03 g(探测概率为 95%,本底为 $1.792 \times 10^{-12} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,无屏蔽);

LBPU, 0.031 8 g(探测概率为 95%,本底为 $1.792 \times 10^{-12} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,无屏蔽)。

该装置的探测灵敏度达到美国人员检测门探测灵敏度标准的 级,接近 级。

4 小结

该装置经刻度和试运行考验,可投入实际应用。还可建立不同性能和特点的用于人员或车辆的放射性监测系统,以适应不同的使用场合。

参考文献:

- [1] Fehlaue PE, Pratt JC, Markin JT, et al. Smarter Radiation Monitors for Safeguards and Security[J]. Journal of the Institute of Nuclear Materials Management, 1983, 12:122~126.

Pedestrian Portal Monitor for Special Nuclear Material

HUANG De-bao, ZHANG Wei-liang, LU Zhao, ZHANG Xiao-hong,
ZHAO Rong-sheng, LIU Da-ming, LI Ji-min, TONG Bo-ting

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-48, Beijing 102413, China)

Abstract: A pedestrian portal monitor for special nuclear material (SNM) and its software are developed. Its performances are as follows: detection sensitivities are 1.03 g and 0.031 8 g respectively for high enrichment uranium and low burned plutonium; false alarm probability is 1/5 500. The portal monitor for SNM is used to prevent unauthorized removal of fissile materials such as ^{235}U and ^{239}Pu in protected area. The monitor uses a personal computer to provide automatic operation. The sequential probability ratio test (SPRT) algorithm is used to determine the presence of SNM over background.

Key words: nuclear safeguards; portal; special nuclear material monitor