

用 γ 计数率的变化定位核元件的技术研究

储诚胜¹⁾ 黄瑞良 刘晓亚 熊宗华 向永春 章剑华

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所 绵阳 621900)

摘要 用标准放射源进行模拟核材料库房监控实验,当放射源被转移出系统的时候,在不同位置探测了 γ 计数率变化,根据 γ 计数率变化的距离平方反比规律实现了被转移的放射源的定位,并估算了该放射源的源强.

关键词 γ 辐射 放射源 定位 核监控

1 引言

核材料安全监控关系到国家机密和公众安全. 为了确保核材料安全,必须通过实时监控,对核材料的非法转移、调换和失窃给出报警. 为此必须通过核监控即对核材料周围辐射场进行实时监控,根据辐射场的变化来确定核材料是否被非法转移,以及什么位置的放射源被转移.

当核材料失窃时,如何根据周围监控探测器的 γ 计数率变化来确定被盗核材料的位置及其 γ 发射率,是核材料监控和核材料核查^[1] 研究的一个重要方面.

2 理论模型计算

根据单个标准放射源的 γ 计数率与探测器到放射源的距离平方反比关系,即

$$A = \epsilon A_0 S / 4\pi r^{2[2]}, \quad (1)$$

其中 ϵ 为探测器的本征 γ 探测效率, A_0 为放射源绝对 γ 发射率 (s^{-1}), S 为探测器的有效探测面积 (cm^2), r 为放射源与探测器端面的距离 (cm).

当将多个探测器排布在未知分布的点放射源周围时,单个放射源移出系统(移出系统表示该放射源被转移到离监测位置足够远的位置,转移后对各个监测探测器贡献足够小可以忽略不计)会引起各探

测器计数率的变化. 先假设只有 4 个探测器,1[#] 探测器、2[#] 探测器、3[#] 探测器和 4[#] 探测器,它们的位置可以通过建立坐标系用相应的坐标表示. 某个放射源被移出系统的时候,4 个探测器的计数率都会发生变化,设变化量分别为 $\Delta A_1, \Delta A_2, \Delta A_3$ 和 ΔA_4 , 因为该放射源被移出了系统,所以每个探测点的计数率的变化就等于该放射源在转移前对该探测器的贡献,假设 4 个探测位置探测器型号相同,探测效率相同,有效探测面积也相同,可得

$$\Delta A_1 / \Delta A_2 = (\epsilon A_0 S / 4\pi r_1^2) / (\epsilon A_0 S / 4\pi r_2^2), \quad (2)$$

其中 r_1 为被拿走的放射源到 1[#] 探测器的距离 (cm); r_2 为被拿走的放射源到 2[#] 探测器的距离 (cm). 令 $K_1 = \Delta A_2 / \Delta A_1$, 即可以得到

$$r_1 / r_2 = (\Delta A_2 / \Delta A_1)^{1/2} = K_1^{1/2}. \quad (3)$$

2.1 平面模型

如果放射源和探测器都在一个平面上,设 4 个探测器坐标分别为 $B_1(x_1, y_1), B_2(x_2, y_2), B_3(x_3, y_3)$ 和 $B_4(x_4, y_4)$, 令被拿走的放射源的位置的坐标为 $D(x, y)$, 由式(3)可得

$$\frac{[(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2]}{[(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2]} = K_1. \quad (4)$$

可以得到被转移的放射源的坐标应该满足下面的圆方程:

2003-01-27 收稿, 2003-05-19 收修改稿

1) E-mail: chuchsh@tom.com

$$\begin{aligned} & [x - (x_1 - K_1 x_2)/(1 - K_1)]^2 + \\ & [y - (y_1 - K_1 y_2)/(1 - K_1)]^2 = \\ & K_1 [(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2]/(1 - K_1)^2. \quad (5) \end{aligned}$$

同理可由2*和3*探测器的计数率变化、3*和4*探测器的计数率变化、1*和3*探测器的计数率变化、1*和4*探测器的计数率变化、2*和4*探测器的计数率变化,依次得到(6)~(10)式:

$$\begin{aligned} & [x - (x_2 - K_2 x_3)/(1 - K_2)]^2 + \\ & [y - (y_2 - K_2 y_3)/(1 - K_2)]^2 = \\ & K_2 [(y_3 - y_2)^2 + (x_3 - x_2)^2]/(1 - K_2)^2, \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & [x - (x_3 - K_3 x_4)/(1 - K_3)]^2 + \\ & [y - (y_3 - K_3 y_4)/(1 - K_3)]^2 = \\ & K_3 [(y_4 - y_3)^2 + (x_4 - x_3)^2]/(1 - K_3)^2, \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & [x - (x_3 - K_4 x_1)/(1 - K_4)]^2 + \\ & [y - (y_3 - K_4 y_1)/(1 - K_4)]^2 = \\ & K_4 [(y_1 - y_3)^2 + (x_1 - x_3)^2]/(1 - K_4)^2, \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & [x - (x_4 - K_5 x_2)/(1 - K_5)]^2 + \\ & [y - (y_4 - K_5 y_2)/(1 - K_5)]^2 = \\ & K_5 [(y_2 - y_4)^2 + (x_2 - x_4)^2]/(1 - K_5)^2, \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & [x - (x_4 - K_6 x_1)/(1 - K_6)]^2 + \\ & [y - (y_4 - K_6 y_1)/(1 - K_6)]^2 = \\ & K_6 [(y_1 - y_4)^2 + (x_1 - x_4)^2]/(1 - K_6)^2, \quad (10) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} K_1 &= (\Delta A_2/\Delta A_1)^{1/2}, K_2 = (\Delta A_3/\Delta A_2)^{1/2}, \\ K_3 &= (\Delta A_4/\Delta A_3)^{1/2}, K_4 = (\Delta A_1/\Delta A_3)^{1/2}, \\ K_5 &= (\Delta A_2/\Delta A_4)^{1/2}, K_6 = (\Delta A_1/\Delta A_4)^{1/2}. \end{aligned}$$

上面(5)~(10)式,其中有3个是线性无关的^[3],可以选取一组线性无关的一组来确定被取走放射源的位置,其中(5)~(7)式是一组线性无关的方程.其中除了放射源坐标是未知的,其他数据可以实验测量,探测器的坐标,根据实验时探测器的位置关系建立相适的坐标系得到.代入方程可求出3个圆的交点,从理论角度,这3个圆,应该通过一个共同的点,这个共同的交点就是我们被拿开放射源的位置.但是由于实验误差和统计涨落,3个圆并没有共同交点,而是相互交于6个点.但是应该有3个点非常靠近,可以取为它们的中心位置近似估计被拿开的放射源的位置.

取某个探测器计数率的变化为 ΔA_i (由前面分析可知,该变化就是该放射源在此探测位置的辐射探测强度);该探测器到该放射源的距离可以由探测器的坐标和定位的放射源的坐标算出,设为 r_i ;此外

还假设探测器的有效接受面积为 S ,该放射源的绝对放射性强度 A_0' 可以用如下公式估计被转移的放射源的强度:

$$A_0' = \Delta A_i 4\pi r_i^2 / \epsilon s. \quad (11)$$

取4个探测器计算结果的平均值可以得到

$$A_0 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 A_0'. \quad (12)$$

这样,当有一个放射源失窃时,可以根据探测器计数率的变化来定位它的位置并估算它的强度.

2.2 立体空间模型

如果放射源和探测器不在一个平面上,设4个探测器的坐标为 $B_1(x_1, y_1, z_1)$, $B_2(x_2, y_2, z_2)$, $B_3(x_3, y_3, z_3)$ 和 $B_4(x_4, y_4, z_4)$,令被拿走的放射源的位置的坐标 $D(x, y, z)$,同2.1节讨论,可以得到3个线性无关的方程组.

$$\begin{aligned} & [x - (x_1 - K_1 x_2)/(1 - K_1)]^2 + \\ & [y - (y_1 - K_1 y_2)/(1 - K_1)]^2 + \\ & [z - (z_1 - K_1 z_2)/(1 - K_1)]^2 = \\ & K_1 [(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2]/(1 - K_1)^2 \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & [x - (x_2 - K_2 x_3)/(1 - K_2)]^2 + \\ & [y - (y_2 - K_2 y_3)/(1 - K_2)]^2 + \\ & [z - (z_2 - K_2 z_3)/(1 - K_2)]^2 = \\ & K_2 [(y_3 - y_2)^2 + (x_3 - x_2)^2 + (z_3 - z_2)^2]/(1 - K_2)^2, \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & [x - (x_3 - K_3 x_4)/(1 - K_3)]^2 + \\ & [y - (y_3 - K_3 y_4)/(1 - K_3)]^2 + \\ & [z - (z_3 - K_3 z_4)/(1 - K_3)]^2 = \\ & K_3 [(y_4 - y_3)^2 + (x_4 - x_3)^2 + (z_4 - z_3)^2]/(1 - K_3)^2. \quad (15) \end{aligned}$$

这3个球面相互交于3个圆,这3个圆应该通过一个共同的点,这个共同的交点就是我们被拿开放射源的位置.但是由于实验误差和统计涨落,这3个圆有6个交点,其中必定有3个非常靠近,取它们的坐标的平均值为放射源的位置就可以了.将上述结果代入(11)式可以估算出放射源的强度.

2.3 模型的角度修正

此模型建立的理论基础是(3)式,这对球形探测器是适用的,但是对于柱形探测器,只有当 γ 射线斜垂直入射时才适用.对柱形探测器当侧面加屏蔽, γ

射线斜入射的时候,(3)式的形式应该为

$$A = \epsilon A_0 S \times \sin\alpha / 4\pi r^2.$$

即

$$A/\sin\alpha = \epsilon A_0 S / 4\pi r^2,$$

其中 α 为入射粒子与探测器表面的夹角.

所以由 2.1 节和 2.2 节的得到的结果有很大偏差. 必须进行优化处理, 这里以平面模型为例子.

(a) 得到的定位结果 3 个比较靠近的交点的平均值为“真正”的交点 $D(x_c, y_c)$.

(b) 由 x_c, y_c 和各个探测器坐标和探测器轴线方向可以得到 4 个探测器的 γ 入射角度 α_i . 代入公式

$$\Delta A_i^* = \Delta A_i / \sin\alpha_i, i = 1, 2, 3, 4.$$

(c) ΔA_i^* 代替 ΔA_i 代入(5),(6),(7)式得到比较靠近的 3 个交点 $D_1(x_{01}, y_{01}), D_2(x_{02}, y_{02}), D_3(x_{03}, y_{03})$.

(d) 重复步骤(a)—(c), 直到 $\delta^2 = (x_{02} - x_{01})^2 + (y_{02} - y_{01})^2 + (x_{03} - x_{01})^2 + (y_{03} - y_{01})^2 + (x_{03} - x_{02})^2 + (y_{03} - y_{02})^2$ 达到最小.

(e) δ^2 达到最小的时候, 取 D_1, D_2 和 D_3 三者的坐标平均值作为定位结果. 对于立体空间模型此方法照样适用.

3 实验

3.1 仪器和放射源

探测器为探测器的灵敏区是同轴型的高纯锗, 其外径为 53.8mm, 长度为 68.3mm; 其内空腔的直径为 9.1mm, 孔深为 55.0mm. 在 1.33MeV 的相对探测效率(^{60}Co)为 30%.

实验用 $\phi 18\text{mm}$ 的 Ba-1x 标准面放射源, 放射性核素为 ^{133}Ba , 活度为: $2.245 \times 10^5 \text{Bq}$, 半衰期: 10.52y.

3.2 实验布局

针对上面的理论模拟计算, 对平面模型安排了实验, 布局如图 1. 选择了单个放射源的布局的情形, 1[#] 探测器正在放射源正右边 20cm 处, 2[#] 探测器正在放射源正前面 40cm 处, 3[#] 探测器正在放射源正左边 60cm 处, 4[#] 探测器正在放射源正后面边 80cm 处. 并建立坐标系, 如图 1.

3.3 实验测量

测量了放射源转移出测量系统时探测器计数率

在上面 4 个位置 γ 计数率变化. 首先测量了放射源被转移前(放射源位于 0 点时)图 1 中 1[#], 2[#], 3[#] 和 4[#] 4 个位置的 γ 计数率, 如表 1. 表 1, 表 2 中的数据实验测量时间都是 1000s.

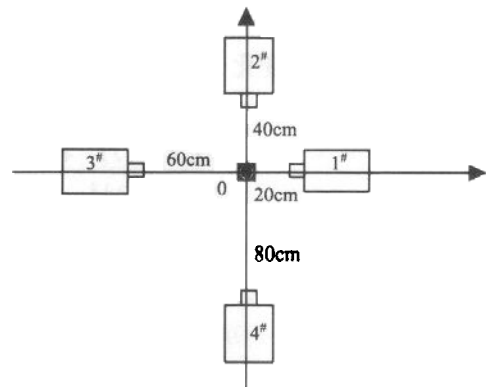


图 1 实验探测位置关系

表 1 放射源被转移前不同位置 γ 计数率

探测器位置	$A_{10}(1^{\#})$	$A_{20}(2^{\#})$	$A_{30}(3^{\#})$	$A_{40}(4^{\#})$
γ 计数率/ s^{-1}	978.2	468.8	348.2	304.2

然后测量了该放射源被拿走(拿走表示放射源被拿到足够远的地方, 转移后对各个探测器计数率没有贡献)后的 γ 计数率(这里由于选择的系统只有一个放射源, 所以放射源拿出系统后的 γ 计数率就是自然本底), 如表 2.

表 2 放射源被转移后不同位置 γ 计数率

探测器位置	$A_1(1^{\#})$	$A_2(2^{\#})$	$A_3(3^{\#})$	$A_4(4^{\#})$
γ 计数率/ s^{-1}	246.5	245.2	246.0	245.1

将每个位置的放射源转移前后测量结果相减就得到该位置的 γ 计数率变化, 1[#], 2[#], 3[#] 和 4[#] 位置测量的计数率变化分别为 $\Delta A_1, \Delta A_2, \Delta A_3$ 和 ΔA_4 , 测量结果如表 3 所示.

表 3 放射源被转移引起不同位置 γ 计数率的变化

探测器位置	$\Delta A_1(1^{\#})$	$\Delta A_2(2^{\#})$	$\Delta A_3(3^{\#})$	$\Delta A_4(4^{\#})$
γ 辐射强度变化/ s^{-1}	731.7 ± 1.1	223.6 ± 0.8	102.2 ± 0.8	59.1 ± 0.7

3.4 实验数据处理

将探测器坐标和各个探测位置计数率的变化代入式(5)—(7). 可以得到, 式(5),(6)的交点坐标为 $D3(-1.76, 0.66), D6(64.31, -15.07)$; 式(6),(7)交点坐标为 $D5(30.58, 161.28), D4(0.27, -0.75)$; 式(5),(7)的交点坐标为 $D1(9.50, 12.31), D2(-5.39, -7.69)$. 如图 2 所示.

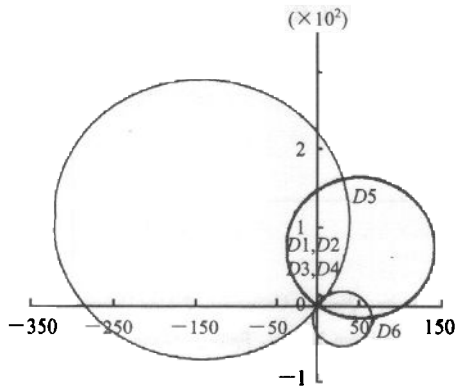


图 2 公式(5),(6),(7)的交点情况图

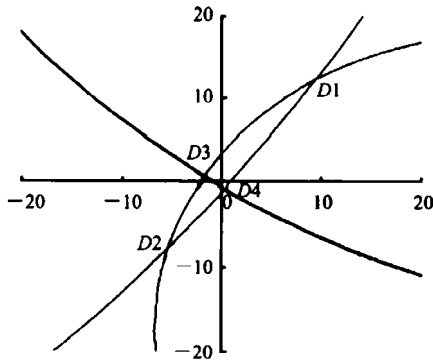


图 3 比较靠近的几个交点详细图

可以看出交点 D_2, D_3 和 D_4 非常靠近,详细情况请看图 3,从理论推导可以看出被转移的放射源在这 3 个交点附近,取它们坐标的平均值,可近似的到被转移的放射源的坐标为 $D(-2.30, -2.59)$. 由于实验安排放射源在各个探测器轴线, γ 射线几乎垂直入射探测器表面,得到结果也可以看出放射源偏离各个探测器轴线位置非常小,所以这里就不进行角度修正. 估算的放射源强度(放射源的绝对 γ 发射率)为 $A_0 = 193088s^{-1}$.

此结果可以用极小法进一步优化,具体步骤如下:

(a) 取 $D(x_c, y_c)$ 为真正的交点;

(b) 根据 D 的坐标和 4 个探测器的坐标由 $A_0^i = 4\pi r_i^2 \Delta A_i / \epsilon S$ 式求 4 个源强 $A_0^i, i = 1, 2, 3, 4$;

(c) 利用极小化算法计算 $\chi^2 = \sum_{i=1}^4 (A_0^i - A_0^0)^2$, 当 χ^2 最小时 $(\chi_{min}^2)_{k=1}$ 的 A_0^0 是比 A_0^i 对源强更好的估计;

(d) 利用求出的 A_0^0 可以得一组新的 $r_j, j = 1, 2, 3, 4$. 根据 $\Delta A_i = \epsilon SA_0^0 / 4\pi r_j^2$, 重新得出 4 个关于放

射源的轨迹圆方程,求出交点 $D(x_c, y_c)$;

(e) 重叠步骤(a)一(d),算出的 $(\chi_{min}^2)_{k=2}$, 如果 $(\chi_{min}^2)_{k=2} < (\chi_{min}^2)_{k=1}$, 那么对应的 A_0^0 是对源强更好的估计;

如此叠代下去,直到 $(\chi_{min}^2)_{k=i}$ 在所有 k 中最小为止.

极小化处理后,得出放射源的坐标为 $D'(-1.2, -0.8)$,放射源源强(放射源的绝对 γ 发射率)为 $A_0^0 = 199161s^{-1}$. 定位结果与实际位置的偏差为 $OD' = 1.44cm$,偏差范围在放射源尺寸 $\phi 18mm$ 内,比处理前的偏差 $OD = 3.46cm$ 小了很多. 实际源强度为 $204480s^{-1}$, A_0^0 是比 A_0 对源强更好的估算.

4 结果讨论

由上可以看出实验结果和理论分析相当吻合,但是实验结果有一定误差. 误差来源,因为放射源相当微弱,所以统计涨落占了相当部分^[4];还有就是实验几何位置测量也有所偏差.

上述实验研究只是单个放射源排布情况,而实际情况是同时排布了很多放射源其中一个被转移出系统,假设多个放射源排布在一起,只有一个被转移,其他的放射源位置,探测器的位置都没有变化,那么这些放射源对探测器计数的变化没有影响,故可以把他们对各个探测器的贡献当成本底计数处理,这样,上述建立的模型依然适用.

但是当把其他没有移动的放射源对各个探测器贡献当本底处理的时候,本底计数将明显高于自然本底,这样计数的统计涨落明显大于自然本底的统计涨落,其统计涨落可能掩盖某个放射源转移引起的计数变化(即放射源对探测器的贡献小于探测器在该本底下的探测下限)^[5],因此会给定位结果带来更大的偏差. 所以此模型从理论角度完全实用,实际上有待进一步研究.

这里的研究讨论的是标准放射源,模拟核材料库房辐射场,为了减少计数率统计涨落,实验安排监测距离都在 1m 范围内,对于实际情况的核材料库房,放射源活度相对很强,那样远距离监测探测器同样能得到较大的计数率,当放射源活度较大时,此模型对监测距离超过 1m 的情形依然适用.

对于实际问题中的体源情况只要探测器和放射源的距离远大于放射源的尺寸,就可以近似用点源模型来处理,从理论近似的角度此模型依然可行.

在实际的核材料库房中核材料元件摆放方式都是多种多样的,而不是单个核材料元件的情形,要把该项计算用于多个体放射源排布的实际库房监测,还需要进一步深入研究,进行实验验证。

此项工作意义在于:为核材料监控提供了初步理论计算模型,是核材料核查和核材料监控中一种可行的方法。

参考文献 (References)

- 1 LIU S P, HU G C et al. *Acta Phys. Sin.*, 2001, **50**: 1405 (in Chinese)
(刘素萍, 胡广春等. 物理学报, 2001, **50**: 1405)
- 2 KNOLL G F. *Radiation Detection and Measurement*. America: JION WILEY & SONS, 1979. 60
- 3 WANG Ling. *Linear Algebra*. Beijing: National Defense Industry Press, 1996. 84 (in Chinese)
(王玲. 线性代数. 北京: 国防工业出版社, 1996. 84)
- 4 Fudan University, Qinghua University, Peking University. *Atomic Nucleus Physics Experiment Method*. Beijing: Atomic Energy Press, 1985. 11 (in Chinese)
(复旦大学, 清华大学, 北京大学. 原子核物理实验方法. 北京: 原子能出版社, 1985. 11)
- 5 WU Xue-Chao, FENG Zheng-Yong. *DP of Nuclear Physics Experiment*, Beijing: Atomic Energy Press, 1988. 184—187 (in Chinese)
(吴学超, 冯正永. 核物理实验数据处理方法. 北京: 原子能出版社, 1988. 184—187)

Study of Radiative Source Positioning by Counting Rate Variations of a Monitor System

CHU Cheng-Sheng¹⁾ HUANG Rui-Liang LIU Xiao-Ya XIONG Zong-Hua
XIANG Yong-Chun ZHANG Jian-Hua

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract Standard radiative source are monitored by a system containing several detectors. When a source moved out from the monitored area, the counting rates of the system will be changed, and the position and radiation intensity of the source can be estimated by the counting rates variations.

Key words γ radiation, radiative source, positioning, nuclear monitoring