

核材料移动对辐射探测器阵列探测下限影响的蒙特卡罗模拟

税 举, 何 彬, 付广智, 李如松, 周百昌

(第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025)

摘要:核辐射探测器阵列的探测下限是判断其是否符合探测要求的重要技术指标。从定性的角度易知, 由于核材料移动时比静止时的探测下限低而更难以探测。文章通过建立蒙特卡罗模型并应用通用软件MCNP程序分析计算核材料的移动对核辐射探测器阵列探测下限的影响。

关键词:核材料; 移动; 辐射探测器阵列; 探测下限; 蒙特卡罗模拟

中图分类号: O572 文献标识码: A 文章编号: 1000-6931(2007)04-0497-04

Monte-Carlo Simulation of Movement of Nuclear Matter Influencing on Minimum Detectable Limit of Radiation Detector Array

SHUI Ju, HE Bin, FU Guang-zhi, LI Ru-song, ZHOU Bai-chang

(The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

Abstract: The minimum detectable limit of the nuclear radiation detector array is an important technic criteria to judge whether the detector satisfies the detecting requirements or not. The detection of moving nuclear material is more difficult than that of static one (namely, the minimum detectable limit of moving nuclear material is lower than that of static one). This study adopts the Monte-Carlo general software—MCNP to compute and analyze the effect of movement of the nuclear matter on the minimum detectable limit of the nuclear radiation detector array.

Key words: nuclear material; movement; nuclear radiation detector array; minimum detectable limit; Monte-Carlo simulation

在核材料快速检测中,应用高性能塑料闪烁体探测器组成多路探测器(探测器阵列)同时进行检测,能获得较好的探测灵敏度。就辐射探测器阵列探测下限的影响因素而言,除探测器自身因素

外,还存在本底变化、核材料的辐射强度及移动等影响因素。核材料移动对核辐射探测器阵列探测下限的影响研究具有重要的意义,通过模拟计算,可为有效进行核材料核查和核查保护提供依据。

1 探测器阵列探测下限

辐射测量中的探测器输出脉冲是一服从泊松分布的随机变量^[1],对于服从泊松分布的随机变量 n ,有:

$$P(E(n) - 3\sqrt{E(n)} < n < E(n) + 3\sqrt{E(n)}) = 0.997 \quad (1)$$

式中: $E(n)$ 为 n 的数学期望; $\sqrt{E(n)}$ 是泊松分布的均方差 σ 。

探测器的净计数和本底计数取决于 3 方面的因素,即探测器的测量时间、探测器对射线的探测效率以及核材料和本底的放射性强度。因此,根据式(1),核材料质量的探测下限 M 可表示为:

$$M = \frac{3\sqrt{n_B \eta_B t}}{I_N \eta_N t} \quad (2)$$

其中: n_B 为对探测器造成影响的本底的强度; η_B 为探测器对本底射线的探测效率; I_N 为单位质量核材料的放射性强度; t 为测量时间; η_N 为探测器对核材料射线的探测效率。

2 核材料移动对辐射探测器阵列探测下限的影响

核材料移动对核材料快速检测系统探测器阵列探测下限的影响主要通过两个方面。其一,核材料的移动引起核材料与探测器阵列间相对位置的变化,进而使探测器阵列对核材料射线的探测效率发生变化,造成探测下限的变化。通常,核材料通过探测器阵列的检测区域时,相对与探测器阵列的距离会有一由远及近、再由近及远的过程,相对应的探测效率随之有一由低到高、再由高到低的过程。其二,当核材料通过探测器阵列的检测区域时,其辐射信号只在检测区域中存在一很短的时间段,核材料的移动速度越快,信号存在的时间越短,探测器阵列的探测灵敏度越低。

设核材料通过探测器阵列的检测区域的位置 $r = r(t) = \{x(t), y(t), z(t)\}$,用实验或理论计算的方法可求探测器阵列对 r 处射线的探测效率 $\eta(r)$ 。令 $dr = v(r)dt$,则探测器阵列的净计数可表示为:

$$S = mI \int \frac{\eta(r)}{v(r)} dr \quad (3)$$

式中: m 为核材料的质量; I 为单位质量核材料的强度; r 的积分范围是从核材料在所考虑的探测区域内路程的起点到终点。

于是,探测器阵列的质量探测下限可表示为:

$$M = \frac{3\sqrt{n_B \eta_B t}}{I \int \frac{\eta(r)}{v(r)} dr} \quad (4)$$

式中: n_B 为可对探测器阵列产生影响的本底强度; η_B 为探测器对本底射线的探测效率; I 为单位质量核材料的放射性强度; t 为测量时间。

3 蒙特卡罗模型的建立和计算

3.1 几何模型的建立

对核材料沿探测区域中心线匀速通过进行模拟计算。探测器阵列由两台大面积平板型单塑料闪烁体探测器(宽 45 cm,长 75 cm,厚 5 cm)组成,分别布放在探测区域(图 1)两侧正对的位置上。

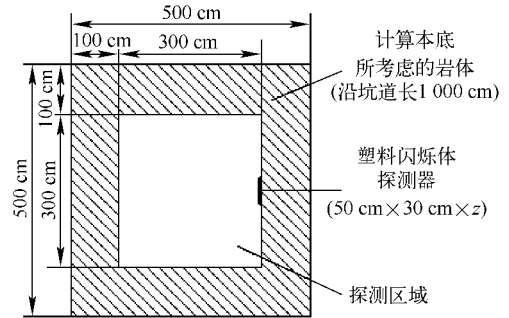


图 1 探测区域的几何模型

Fig. 1 Geometry model for detecting field

图 1 中,中间白色部分为探测区域,周围阴影部分为水泥屏蔽体,中间白色区域内的黑影为塑料闪烁体探测器。在模型中,设探测区域截面为 300 cm×300 cm,所考虑的水泥屏蔽体厚度为 100 cm,沿探测区域的长度为 1000 cm。塑料闪烁体观测面长 50 cm、宽 30 cm(沿探测区域方向为宽度),其厚度根据设计需要,从 1.0 cm 到 8.0 cm 每隔 0.5 cm 选取一个点。在塑料闪烁体的外面包一层厚度为 0.01 cm 的铝箔,作为闪烁光子的反射材料。

各栅元的划分和核素组成、源抽样区域和源分布等设置,按图 2 所示建立的蒙特卡罗模型^[2-3]进行。

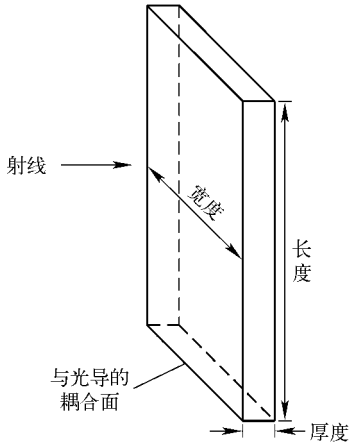


图2 计算光子收集效率的几何模型
Fig. 2 Geometry model for computing the photon collection efficiency

图2中的长方体为一大面积平板型塑料闪烁体探测器,其底面与光导耦合,除底面外的各侧面包有反射材料。

3.2 蒙特卡罗计算

3.2.1 光子的产生 设闪烁体的长度、宽度和厚度分别为 a, b 和 c ,通过6个随机数可确定光子的初始位置与飞行方向。光子的初始位置为 $r(a_1 a, a_2 b, a_3 c)$,其中, a_1, a_2, a_3 为 $[0, 1]$ 间的随机数。初始飞行方向由下列各式确定:

$$u = \cos(a_4 \cdot \pi) \tag{5}$$

$$v = \sqrt{1 - u^2} \cos(a_5 \cdot 2\pi) \tag{6}$$

$$w = \sqrt{1 - u^2} \sin(a_6 \cdot 2\pi) \tag{7}$$

其中: a_4, a_5, a_6 为 $[0, 1]$ 间的随机数; (u, v, w) 为光子飞行方向的方向余弦。

3.2.2 光子在闪烁体内的输运 闪烁光子随机游动过程结束的条件是光子被介质吸收或光子被收集。模型中假定,探测器对闪烁光子是密闭的(除被收集外),不考虑光子飞离系统。设光子的初始状态为:位置 $r(a_1 X, a_2 Y, a_3 Z)$,方向 (u, v, w) ,可求得下次碰撞点的坐标后,进而求出光子两次碰撞间所行走的距离 L ,则光子在闪烁体内经过距离 L 后不被吸收的概率 $P(L)$ ^[4]为:

$$P(L) = \exp(-L/D) \tag{8}$$

式中: D 为光子在闪烁晶体内的技术光衰减长度,单位为 cm ; L 为光子两次碰撞间所行走的距离,单位为 cm ; $1/D$ 为闪烁体的有效衰减指数,单位为 cm^{-1} 。

把 $P(L)$ 与 $[0, 1]$ 间的随机数相比较, $P(L)$ 小时,该光子被吸收; $P(L)$ 大时,光子在闪烁体表面发生反射或折射。

3.2.3 闪烁光子与晶体表面的作用 光子与闪烁晶体的表面发生相互作用,其反射率由菲涅耳公式^[5]给出,有:

$$R_F = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\tan^2(\theta - \theta')}{\tan^2(\theta + \theta')} + \frac{\sin^2(\theta - \theta')}{\sin^2(\theta + \theta')} \right\} \tag{9}$$

式中: R_F 为反射率; θ 为入射角; θ' 为折射角。

当闪烁晶体表面为镜面时的反射角与入射角相同、闪烁晶体表面为粗糙面时,反射角与入射角无关,遵从 Lambert 定律^[6],有:

$$\frac{dI(\varphi)}{dI_0} = \cos \varphi \tag{10}$$

式中: φ 为相对于晶体表面法线方向的反射角。

光子在漫反射情况下,其方向余弦在垂直于闪烁体表面坐标轴上的分量为 $\cos \varphi$ 或 $-\cos \varphi$,在闪烁体表面的分量与另外两个坐标轴的夹角在 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布。

3.2.4 闪烁光子与外部反射材料的作用 光子折射出闪烁体后,如果晶体外包有反射材料,光子将与反射材料相互作用。按照作用的属性可以分为两类:一类为镜面反射,反射角与入射角相同;另一类为漫反射,反射角与入射角无关,由 Lambert 定律给出。前者称为镜面反射材料,后者称为漫反射材料。记正对探测器探测区域的截面中心处为 O ,则探测器阵列对核材料在与 O 点不同距离处的探测效率示于图3。根据计算结果,可得 $\eta(x)$ 的最小二乘法3次拟合曲线为:

$$\eta(x) = 7.7196 \times 10^{-5} x^3 - 3.0465 \times 10^{-4} x^2 - 7.9889 \times 10^{-5} x + 1.1099 \times 10^{-3} \tag{11}$$

式中, x 的单位为 m 。

从式(11)及图3可看出,探测器阵列的探测效率随核材料在与 O 点不同距离处的变化规律大致呈距离越远探测效率越低的趋势。

4 讨论与小结

由式(4)知,当核材料以匀速直线通过探测器阵列的探测区域时,探测器阵列的探测下限为:

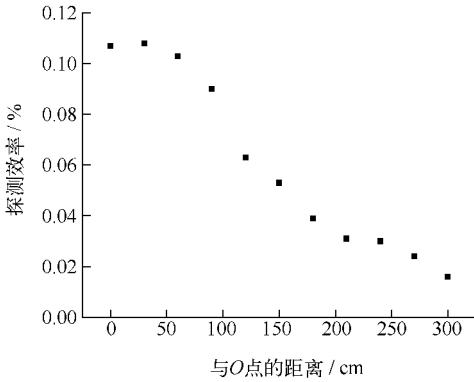


图3 探测器阵列对核材料在与O点不同距离处的探测效率

Fig. 3 Detecting efficiency of detector array detecting nuclear material at different distances of O point

$$M = \frac{3 \sqrt{n_B \eta_B} \frac{L}{V}}{\frac{I_N}{V} \int_{x_1}^{x_2} \eta(x) dx} \quad (12)$$

式中： V 为核材料的移动速度； L 为核材料走过的路程； x_1 、 x_2 分别为核材料所走路程的起点和终点。

当核材料静止于O点时，探测器阵列的探测下限为：

$$M' = \frac{3 \sqrt{n_B \eta_B} t}{I_N \eta(O) t} \quad (13)$$

如果测量时间相同，将 $t = \frac{L}{V}$ 代入式(13)，

可得核材料静止于O点时的探测下限与其以匀速直线通过时的探测下限的比值为：

$$\frac{M'}{M} = \frac{2 \int_0^3 \eta(x) dx}{\eta(O)L} \quad (14)$$

由式(14)可看出，若测量的时间相同，则核材料静止于O点与其以匀速直线通过探测区域时的探测下限的比值随移动的距离增大(移动速度越大)而减小；比值越小，表明静止相对于移动时的探测下限越低，移动速度越大，越难以探测。若考虑的路径长，600 cm，且以O点为中心，计算易得核材料静止于O点时与其以匀速直线通过时探测下限的比值为0.538，即在此时，静止相对于匀速直线通过时的探测下限低约50%。在核材料实际核查和核查保护中，通过式(14)可对核材料移动时的探测值进行修正，并结合相关的核查知识，从而可进一步增强核查和核查保护的有效性。

参考文献：

- [1] 复旦大学, 清华大学, 北京大学. 原子核物理实验方法[M]. 3版. 北京: 原子能出版社, 1997: 2-7.
- [2] 金文绵, 李素梅. MCNP3B使用手册[M]. 北京: 中国原子能科学研究院计算机应用研究所, 1998.
- [3] 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M]. 北京: 原子能出版社, 1996.
- [4] 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.
- [5] 叶华俊, 鲍超, 刘华峰. 光子在闪烁晶体中传输的蒙特卡罗模拟[J]. 光电工程, 2002(8): 53-56. YE Huajun, BAO Chao, LIU Huafeng. Monte-Carlo simulation for transmission of photon in scintillation crystal [J]. Opto-Electronic Engineering, 2002(8): 53-56 (in Chinese).
- [6] 格伦·F·诺尔. 辐射探测与测量[M]. 李旭等, 译. 北京: 原子能出版社, 1988.