

11-17-2021

Modeling and Simulation of Radiation Measurement System Based on Monte Carlo Method

Jinghai Cheng

1. Medical Imaging College, Shanghai University of Medicine & Health Sciences, Shanghai 201318, China;;

Hongzhi Wang

2. School of Physics and Electronic Science, East China Normal University, shanghai 200062, China;;

Luoyuan Xu

3. Shanghai Training Cloud Education & Technology Co., Ltd, shanghai 200090, China;;

Xia Tian

3. Shanghai Training Cloud Education & Technology Co., Ltd, shanghai 200090, China;;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Simulation of Radiation Measurement System Based on Monte Carlo Method

Abstract

Abstract: A method is applied to build a virtual simulation radiometric measurement system. The mathematical and physical models of gamma ray interaction with matter, radiation sources, measurement electronics system and protective materials are constructed by using Monte Carlo method. Through numerical calculation and scene simulation of the radiation measurement system, virtual simulation acquisition and energy spectrum processing of radiation measurement data are realized. *It, the system, can simulate single channel measurement and computer multi-channel measurement experiments. It can realize energy measurement, activity measurement and energy spectrum measurement of mixed, unknown or custom radiation sources in different size crystals. It can be used for specific lead activity and Half-value Layer measurement, protection performance measurement and evaluation of different materials, development and test calibration of radiometric instruments, comparison of energy spectra of unknown radiation sources, etc.*

Keywords

radiometric measurement, simulation system, monte carlo, energy spectrum

Recommended Citation

Cheng Jinghai, Wang Hongzhi, Xu Luoyuan, Xia Tian. Modeling and Simulation of Radiation Measurement System Based on Monte Carlo Method[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(11): 2663-2672.

基于蒙特卡罗法的放射测量系统建模与仿真实现

程敬海¹, 汪红志², 徐罗元³, 夏天³

(1. 上海健康医学院 医学影像学院, 上海 201318; 2. 华东师范大学 物理与电子科学学院, 上海 200062;
3. 上海培云教育科技有限公司, 上海 200090)

摘要: 基于蒙特卡罗方法, 通过对伽马射线与物质相互作用、放射源、测量电子学系统和防护材料等建模, 构建放射线探测与电脉冲产生的物理数学模型, 进行模拟数据采集算法程序实现, 并结合适当的测量系统场景仿真模型, 交互式完成放射线测量数据的模拟采集以及后续的能谱处理。该仿真系统可虚拟仿真单道脉冲幅度分析和计算机多道测量实验, 可实现混合源、未知源或自定义放射源在不同尺寸晶体下的能量、活度和能谱测量实验项目; 可开展铅当量和半价层测量、不同材料防护性能测量评价等实验项目; 可用于放射测量仪器开发和测试校准, 未知放射源能谱比对等。

关键词: 放射测量; 仿真系统; 蒙特卡罗; 能谱

中图分类号: TP319; TL99; TL81 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X (2021) 11-2663-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-FZ0733

Modeling and Simulation of Radiation Measurement System Based on Monte Carlo Method

Cheng Jinghai¹, Wang Hongzhi², Xu Luoyuan³, Xia Tian³

(1. Medical Imaging College, Shanghai University of Medicine & Health Sciences, Shanghai 201318, China;
2. School of Physics and Electronic Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China;
3. Shanghai Training Cloud Education & Technology Co., Ltd, Shanghai 200090, China)

Abstract: A method is applied to build a virtual simulation radiometric measurement system. The mathematical and physical models of gamma ray interaction with matter, radiation sources, measurement electronics system and protective materials are constructed by using Monte Carlo method. Through numerical calculation and scene simulation of the radiation measurement system, virtual simulation acquisition and energy spectrum processing of radiation measurement data are realized. *It, the system, can simulate single channel measurement and computer multi-channel measurement experiments. It can realize energy measurement, activity measurement and energy spectrum measurement of mixed, unknown or custom radiation sources in different size crystals. It can be used for specific lead activity and Half-value Layer measurement, protection performance measurement and evaluation of different materials, development and test calibration of radiometric instruments, comparison of energy spectra of unknown radiation sources, etc.*

Keywords: radiometric measurement; simulation system; monte carlo; energy spectrum

引言

放射测量广泛应用于国防军事、医疗卫生、环境保护等领域, 与人类的生产活动息息相关。由于放射线肉眼不可见, 因此放射线测量是人类认识射

线和利用射线的基本工具。放射测量是影像医学与核医学专业中的 X 射线成像(如 DR 和 CT)与核医学成像(如 PET 和 SPECT)的物理基础, 也与地质勘探、采矿工程、石油能源、农业育种、环境工程等专业密不可分。放射性测量内容包括活度测量、

收稿日期: 2021-06-12 修回日期: 2021-08-14

第一作者: 程敬海(1974-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为核辐射测量、放射治疗技术、核医学成像。E-mail: chengjih@sumhs.edu.cn

通讯作者: 汪红志(1975-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为辐射防护、核磁共振成像、数值仿真。E-mail: hzwang@phy.ecnu.edu.cn

能量测量和能谱测量;测量类型包括绝对测量和相对测量;测量目的包括定性测量、定量测量、定位测量等。进行放射测量时,按测量射线种类可分为 α 射线、 β 射线和 γ 射线测量;按照测量系统的工作模式可分为模拟单道测量和计算机多道测量。

放射测量技术应用是典型的随机统计性事件,往往采用蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)方法进行模拟仿真。基于 MC 数值模拟方法,欧美一些国家实验室和研究所发展了专门开展核技术研究相关的软件模块^[1-8],比如美国橡树岭国家实验室的 MOSE 程序、美国斯坦福直线加速器中心的 EGS 程序、美国圣地国家实验室的 SANDYL 和 TIGER 程序、美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的 MCNP 程序、欧洲核子所的 GEANT 和 GATE 程序、英国的 MCBEND 程序以及法国的 TRIPOLI 程序等。基于此类程序内核,国内外研究者对射线在探测器中的响应、探测效率、能量分辨率等方面做了很多的数值计算仿真研究,其结果对本研究提供了很多有价值的参考。张富利等^[9]基于 BOMAB 体模的数学模型,利用 Cs137 点源,通过对 HPGe 和 NaI 晶体尺寸进行调整,获得正确的探测器几何参数。在 γ 射线能量 126~1836 KeV 范围内,采用 MC 法,结合核应急情况下体内核素探测几何模式,分别计算 HPGe 探测器和 NaI 探测器对 BOMAB 体模的计数效率,并根据计算结果拟合出相关的效率曲线和函数。钱雅兰等^[10]提出了一种基于探测对象、准直器和高纯锗探测器组合为例的空间分布探测效率实时数值计算方法。采用该方法对不同位置、不同能量的点放射源进行效率刻度,与 MC 方法计算结果进行比较,其相对偏差均在 5% 以内。许阳阳等^[11]使用 MC 软件模拟不同探源距、真空度下的 α 放射源的能谱测量,使用 SRIM 模拟 5 MeV α 粒子在空气和死层中的射程及分布,并使用 PIPS- α 谱仪测量 Am241, Pu238, Pu239 标准源的实际能谱。根据实验与模拟的结果,分析各个因素对探测效率的

影响,并计算得到谱仪对不同 α 放射源的本征探测效率。钟丁生等^[12]利用软件 MCNP 模拟分析计算在相同放射源的情况下改变 G-M 计数管结构材料,研究其对能量沉积的影响。张明等^[13]利用 Geant4 数值计算程序,对放射源 Cs137 和 Co60 发射的单能 γ 射线(0.662 MeV 和 1.331 MeV)经过井型 NaI (TI)晶体探测器后的能谱进行了 MC 模拟,并通过改变放射源在井型 NaI (TI)晶体中的位置对探测效率的影响做了进一步的研究。张文利等^[14]提出了一种利用符合技术降低本底以提高放射性监测仪器测量下限的方法,当放射源寿命短且具有级联关系时,存在标准体源难以制备和本底计数过高的问题,针对这 2 个问题探讨了一种基于点源模拟法的体源全能峰测量实验方法。该方法使用 Na22 代替标准 N13 源,测量了直径为 290, 300, 350, 400 mm 的体源全能峰符合探测效率,并用 Geant4 软件进行了符合效率模拟计算。田自宁等^[15]根据点源、面源和体源探测效率之间的函数关系,建立了虚拟源刻度方法。对于大面积及大体积放射源,可将其探测效率进行分割,利用 MC 输运程序进行计算,然后利用虚拟点源模拟体源峰效率。模拟过程中将虚拟点源发射的放射性粒子准直成锥形发射,以方便计算。

这些研究都是调用上述已有的程序内核,通过调整各种实验参数给出计算结果,进行理论分析。文献[16]基于 MC 方法,通过自行编程对不同尺寸的 γ 射线探测器的响应函数和探测效率进行了数值模拟研究,取得了较好的仿真效果。但其关注点在于不同尺寸探测器对 γ 射线的响应函数,以进行探测效率的刻度对比,没有考虑放射测量系统的其他环节(如核电子学部件、防护材料、本底、几何因子、未知源和混合源等)在实际测量中必然存在的影响因素。

放射测量信号属于随机信号,所构筑的数学物理模型必须符合放射测量随机信号的特点。MC 方法是处理随机性信号的基本科学方法,是一种统计

模拟的方法, 采用的是随机抽样技术。由于 MC 方法能够比较逼真描述事物的特点及物理实验过程, 解决一些数值方法难以解决的问题, 而得到广泛应用。

MC 方法是一种基于“随机数”抽样, 以概率统计理论为基础的数值模拟计算的方法。通常 MC 方法以信息技术为平台, 通过科学合理的物理数学统计建模, 将复杂的物理数学问题转化成随机数及其数字特征的模拟和计算, 以寻求所要解决问题的过程规律。

因此, 本研究从 γ 射线与物质的相互作用基础出发, 自行开发了基于 MC 方法计算内核。同时, 结合放射源、探测器、核电子学系统建模, 研发一套在操作体验、实验现象和实验结果上与真机系统高度逼真的放射测量仿真系统, 并在疫情期间, 开展了在线实验教学实践和功能迭代, 取得了较好的仿真结果。

本研究以 γ 射线源和 NaI(Tl) 闪烁晶体作为仿真系统研发示例, 其他放射线类型和探测器灵敏物质, 只需要改变射线与物质的相互作用计算模型, 开发思路与过程基本相同。

1 系统建模与开发

本研究基于现有的放射线物质相互作用理论, 系统仿真模型与常规的放射测量系统相同。限于篇幅相关理论介绍和分析从略, 仅阐述本研究的建模和开发流程。

1.1 系统建模流程

首先, 分别构建 γ 放射源模型(含本底)、射线探测灵敏物质模型、射线测量核电子学系统场景结构模型、防护材料模型、射线测量核电子学部件模型、射线与晶体探测灵敏物质相互作用模型等子模型; 其次, 构建射线经防护材料后的衰减计算模型和射线在探测器中的能量沉积计算数学模型, 将计算得到的能量沉积转化成电脉冲信号并经相应电

子学模拟处理和记录显示, 完成所述射线的测量信号的模拟采集和记录显示; 最后, 将数据进行分析和处理, 得到不同测量结果或结论。放射测量系统仿真对象建模流程如图 1 所示。

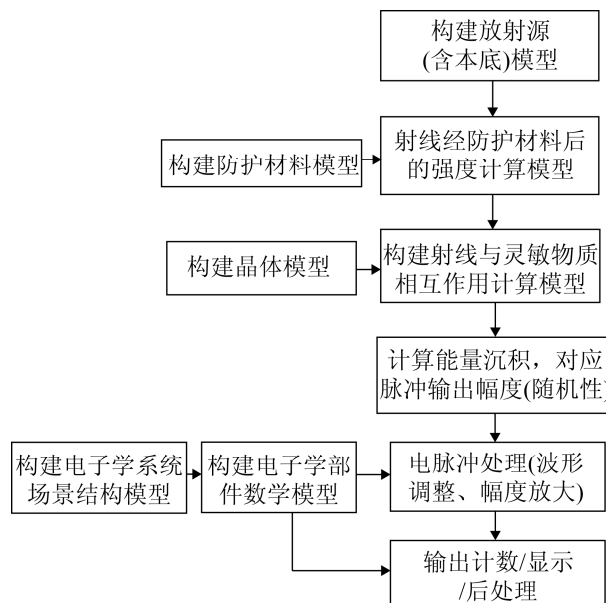


图 1 放射测量系统仿真对象建模流程

Fig. 1 Modeling process of radiation measurement system simulation object

1.2 放射源随机性模拟

放射源模型包括放射源结构、尺寸、活度(已知或随机未知)、能量(已知或随机未知)、半衰期、本底活度和能量分布等。放射线粒子则包括放射位置、出射方向、数量、能量等 4 个方面的随机性。

1.2.1 放射源粒子出射位置随机性模拟

实际放射源一般为面源, 虽然有直接进行面源二维位置模拟放射的, 但考虑到计算消耗的问题, 本研究将不同尺寸的面源都等效为点源来进行模拟。图 2 所示为放射面源和探测器几何关系。由该关系可知, 在探测器灵敏物质半径 R 、面源半径 r 以及源探距 d 确定的情况下, 面源可以等效为一个源探距为 d' 的点源。等效为点源后, 位置随机放射就归一为一个点状发射, 即所有粒子都是从同一个空间位置点发出的。

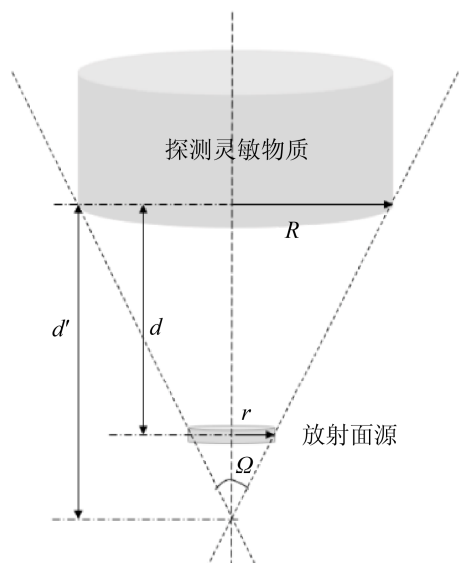


图2 放射面源与探测灵敏物质几何关系

Fig. 2 Geometric relationship between radioactive surface source and detection sensitive material

1.2.2 放射源粒子出射方向随机性模拟

出射方向可认为是在 Ω 立体角内是各向同性的。由图3所示的出射方向几何关系可知,每个放射线出射方向由射线与轴线的夹角 α 和在平面的方位角 β 共同确定。 α 在 $[-\text{actg}(R/d'), \text{actg}(R/d')]$ 范围内等概率随机抽样,抽样步进可以为 0.1 或 0.5° 。方位角 β 则在 $[0, 359^\circ]$ 之间等概率随机抽样,抽样步进可以为 1° 。如此出射方向的随机化,对应到探测器灵敏物质的入射点位置也是随机的:

$$x = d' \text{tg} \alpha \cos \beta, \quad y = d' \text{tg} \alpha \sin \beta$$

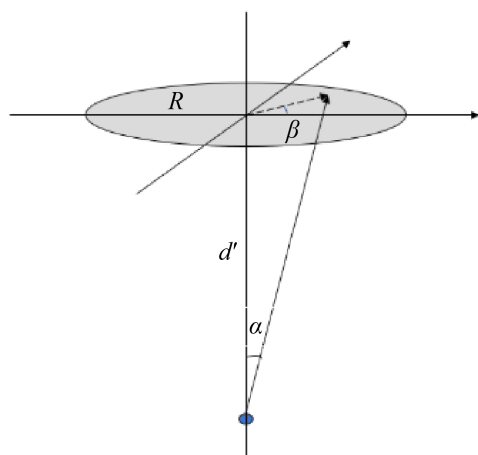


图3 放射线出射方向几何关系

Fig. 3 Geometric relationship of radiation emission direction

1.2.3 放射源粒子数量随机性模拟

用于放射源模拟计算的粒子数量 A 按照实验设定的活度 A_0 、灵敏立体角 Ω 以及正态随机效应综合计算: $f(A) = \exp\left[-\left(A - \frac{A_0 \Omega}{4\pi}\right) / \sqrt{2\sigma^2}\right]$, $A_0 \Omega / 4\pi$ 为灵敏区内的放射线活度均值,不考虑发射到灵敏区域外的放射线,避免计算消耗。 σ 为正态展宽的标准差,与具体放射源特性相关。

1.2.4 放射源粒子能量随机性模拟

尽管大多数放射源发射的 γ 射线为单能的(如 ^{137}Cs 的 $E_\gamma = 0.662 \text{ MeV}$),但有些放射源可以放出多种能量的 γ 射线(如 ^{60}Co 的 γ 射线的能量 $E_{\gamma_1} = 1.17 \text{ MeV}$, $E_{\gamma_2} = 1.33 \text{ MeV}$)。另外,进行多能的放射源模拟,还可以开展混合源的实验效果验证。

因此射线能量随机抽样,根据放射源或混合源中不同能量射线的活度比例(比如 ^{60}Co 的2种能量射线的数量比例为 1:1)进行相应比例的随机数抽样。

1.3 防护材料建模

防护材料建模包括材料的种类和厚度,材料种类包括常用的 Pb, Cu, Al 等。构建时建立相应的材料密度 ρ 、有效原子序数 Z 均可查阅资料给出。厚度默认为 1 mm ,可以选择多层材料来模拟复合型防护材料。放射源经防护材料后的强度根据 $I = I_0 \cdot e^{-dKZ^4/\rho}$ 计算得到。 I_0 为入射射线强度; d 为防护材料厚度; Z 为防护材料原子序数; λ 为射线波长; ρ 为防护材料密度。

1.4 基于 MC 法的射线与灵敏物质相互作用计算模型

放射测量系统中,放射线随机产生并进入灵敏物质后,可以根据射线能量与灵敏物质特性,计算出各种效应作用(光电效应、康普顿效应、电子对效应)截面(概率大小)。并根据概率密度分布关系,利用 MC 抽样原理,随机抽样与灵敏物质发生不同的相互作用。作用后,其产生的次级射线(康普顿

效应产生的散射光子或电子对效应产生的湮灭光子)与灵敏物质再次随机发生某种相互作用, 最终被物质完全吸收。计算整个过程中最终沉积在物质中的射线能量, 并将沉积的能量转化成产生荧光光子数, 经光电倍增管仿真模型计算成输出电脉冲幅度(均为正比例关系)。

每次相互作用中, 都会有一定比例的射线或次级射线不与物质发生作用, 逃出灵敏物质, 则射线的全部能量或部分能量将不会被沉积下来, 导致输出脉冲的幅度有统计性差异。

本研究采用 MC 方法构建射线与灵敏物质相互作用计算模型, 通过模拟大量的放射线粒子的随机性作用过程的统计规律来重现实效。这种模拟不是通过实际物理实验方法, 而是通过随机数的方法来进行数值计算和统计来仿真实现。

射线与物质的相互作用也是随机性的, 就是说是否发生作用、相互作用类型(光电效应、康普顿效应和电子对效应)以及散射线是否有逃逸等过程

随机, 通过具体的伽马射线与灵敏物质(闪烁晶体)模拟计算流程如图 4 所示。

1.4.1 射线未与灵敏物质发生相互作用

随机入射到探测灵敏物质内随机位置的一个伽玛射线事件, 计算其随机运动距离 L , 当距离大于晶体尺寸 D 时, 射线穿出, 即没有被探测到, 本次计数将作为计算探测效率的数据被存储, 本次入射事件结束。随机运动距离^[16]:

$$L = \ln(\epsilon) / (\tau_m + \sigma_m + k_m) \tag{1}$$

式中: ϵ 为[0, 1]之间的随机数; τ_m , σ_m , k_m 分别为光电作用截面、康普顿作用截面和电子对作用截面。

具体与能量相关的作用截面数值可通过国际通用的作用截面计算软件 XCOM: Photo Cross Section Database (V1.3)计算得到。

初次入射射线能量为某确定值, 但该规律也适用于后续康普顿散射光子的二次相互作用之前的运动距离计算。

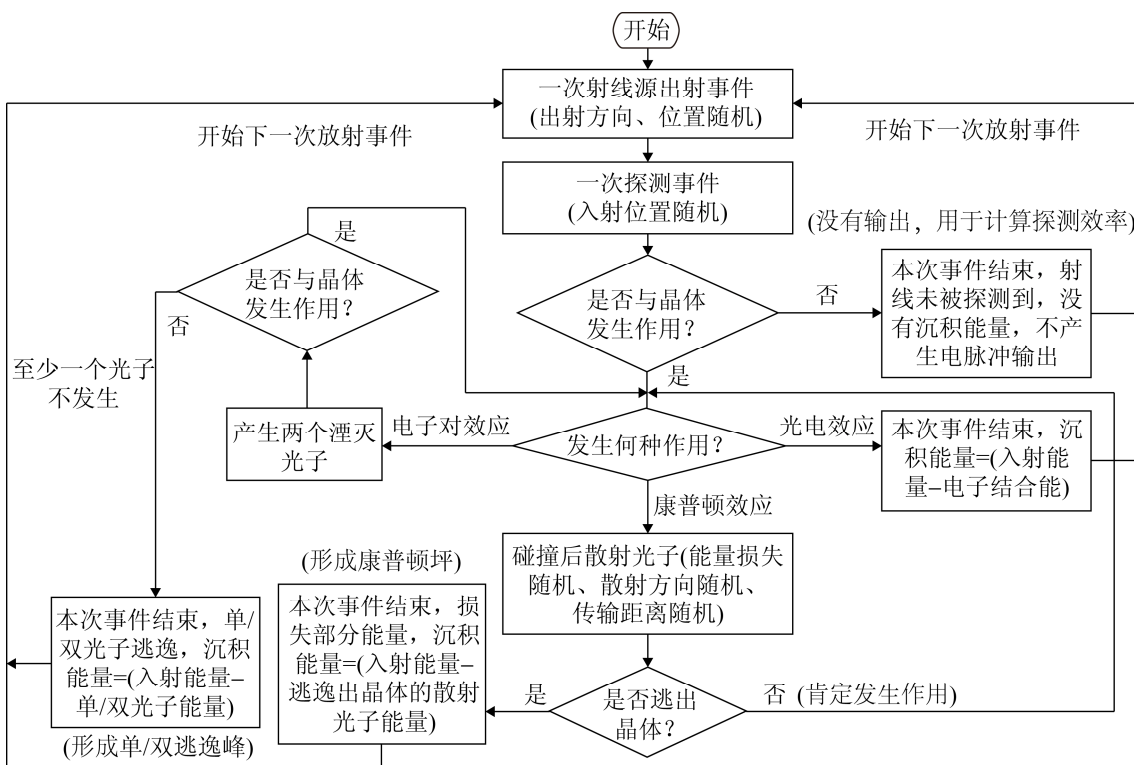


图 4 伽马射线与闪烁晶体相互作用计算模型

Fig. 4 Calculation model of interaction between gamma ray and scintillation crystal

1.4.2 射线与灵敏物质发生光电作用

再一次入射事件, 随机其运动距离, 当距离小于晶体尺寸时, 说明射线与灵敏物质发生了某种相互作用。根据相互作用截面计算, 随机确定相互作用的可能类型。

发生光电效应的概率, 即光电作用截面遵循 $\tau_m \propto Z^4/h\nu^3$ 。当发生光电效应时, 入射射线消失, 损失一部分电子结合能后打出一个电子, 沉积能量=(入射射线能量-电子结合能), 能量沉积会产生一个幅度与沉积能量成正比的电脉冲, 类似的电脉冲最后形成光电峰。

1.4.3 射线与灵敏物质发生康普顿作用

射线随机入射事件, 随机其运动距离, 当距离小于晶体尺寸时, 说明射线与灵敏物质发生了某种相互作用。根据相互作用截面计算该作用的可能类型。

发生康普顿效应的概率, 即康普顿作用截面遵循 $\sigma_m \propto Z^2/h\nu$ 。当发生康普顿效应时, 入射射线损失一部分电子结合能后打出电子, 自身变成散射线, 散射线相当于一次新的射线入射事件, 再次开始与灵敏物质的相互作用计算。最终沉积能量=(入射射线能量-电子结合能-出射的散射线能量), 能量沉积会产生一个幅度与沉积能量成正比的电脉冲, 类似的电脉冲最后形成康普顿峰。

散射方向 φ 为 $[0, 180^\circ]$ 之间随机确定后, 散射射线的能量为

$$h\nu' = h\nu / (1 + h\nu(1 - \cos\varphi) / m_0c^2) \quad (2)$$

式中: $h\nu$ 和 $h\nu'$ 分别为入射射线和散射线能量; m_0c^2 为电子静止质量能量。

散射线相当于是又一次不同能量的射线入射事件, 再次进行依次随机计算过程。

1.4.4 射线与灵敏物质发生电子对作用

再一次入射事件, 随机其运动距离, 当距离小于晶体尺寸时, 说明射线与灵敏物质发生了某种相互作用。根据相互作用截面计算, 随机确定相互作用的可能类型。

发生光电效应的概率, 即光电作用截面遵循 $k_m \propto Z^2 \ln(h\nu)$ 。当发生光电效应时, 入射射线消失, 产生一对正负电子, 正电子湮灭后, 产生能量为 0.511 MeV 的 2 个 γ 光子。这 2 个 γ 光子相当于 2 个同时入射的 γ 射线, 重复与灵敏物质的相互作用计算模型, 1 个或 2 个光子可能没有发生作用而逃逸出晶体。最终沉积能量=(入射射线能量-电子结合能-单/双逃逸湮灭光子的能量), 能量沉积会产生 1 个幅度与沉积能量成正比的电脉冲, 类似的电脉冲最后形成单/双逃逸峰; 入射事件结束。

对上述随机相互作用类型不断重复计算和能量判断输出, 直至按照测量活度 \times 测量时间 \times 几何因子 \times 防护材料衰减比例的所有射线入射事件都完成计算后, 计算停止。

1.5 放射测量电子学系统场景建模

为了增强仿真测量系统使用过程中对仪器系统的认知概念, 加强单道和多道测量模式下测量单元与部件之间的相互关系的学习。测量仿真系统增加了与实际系统相同的系统连线的实训操作。因此, 本研究对射线测量电子学系统场景进行建模, 构建系统部件。这些部件包括放射源(源罐)、探头、主放、单道、率表、定标器、ADC 多道、高压电源、防护材料等; 将实际测量系统的高清照片中的每个部件的连线接口、拨码开关、电源开关、旋钮、数码显示管、液晶屏等都设计成热点, 并激活热点, 赋予其接线、拨码操作或切换刷新显示等功能。

1.6 放射测量电子学系统功能建模

为了实现对实际测量条件、测量过程和测量结果的高度仿真, 构建放射线测量各个电子学部件的物理数学模型, 包括光电倍增管、前放、主放、单道、率表、定标器、ADC 多道、高压电源等部件。光电倍增管模型包括高压电源、倍增极数量、倍增比例等参数; 前放模型包括放大倍数

和信号输出能力; 高压电源包括输出高压值; 主放模型包括放大倍数粗调、放大倍数细调、积分时间、微分时间等; 单道模型包括下阈、上阈、道宽、手动/自动调节模式选择等; 率表模型包括量程、时间常数; 定标器模型包括噪声电压、自检/工作模式选择、测量时间、自动/半自动计数模式选择等; ADC 多道模型包括道数、噪声阈值等; 单道模块, 设置为半自动模式时, 每个阈值测量结束后, 需要手动调节下阈, 才可继续下一次测量。设置为自动模式时, 每个阈值测量结束后, 系统自动增加下阈。定标器模块, 设置为自检时, 输出计数为模拟晶振的时钟计数, 每秒钟显示数为 32 768; 设置为工作时, 显示为射线探测事件计数。

1.7 仿真测量系统开发

在上述建模的基础上, 本研究采用 Python 实现数值仿真内核, 采用二维动画引擎 Phaser 工具结合脚本编程语言 JavaScript 实现场景仿真, 最后采用 html 将场景仿真和数值仿真结合进行网络界面编程, 并将程序发布为网络运行模式, 实现任何时间、任何地点、任何人的使用。

2 仿真系统效果

2.1 仿真系统主界面

该仿真系统可以工作于单道模式和计算机多道模式, 软件界面如图 5 所示。界面左侧为参数区, 包括放射源、探测器和测量参数设置。主界面中间部分为场景模块, 场景模块可通过双击接线柱热点开展系统连接线的实训操作, 接线错误会有提示。为避免操作者长久接线不正确, 无法开展实验, 该系统设置了一键接线模式, 可捷径完成连线进入实验状态。主界面右侧上部, 为测量电子学系统各部件的参数调节设置区, 单道模式下, 包括探头、线性放大器、单道幅度分析器、定标器和线性率表的各参数。多道模式下, 只有探头、线性放大器和数模转换 ADC 模块的参数设置。主界面右侧下部, 是单道或多道测量数据显示和处理区, 包括相应能谱处理功能, 如寻峰、峰面积积分、半高宽计算、能谱平滑等。主界面下部是功能按钮, 包括一键接线、放置/移除放射源、测量计数、数据清零等 3 种测量数据显示方式。

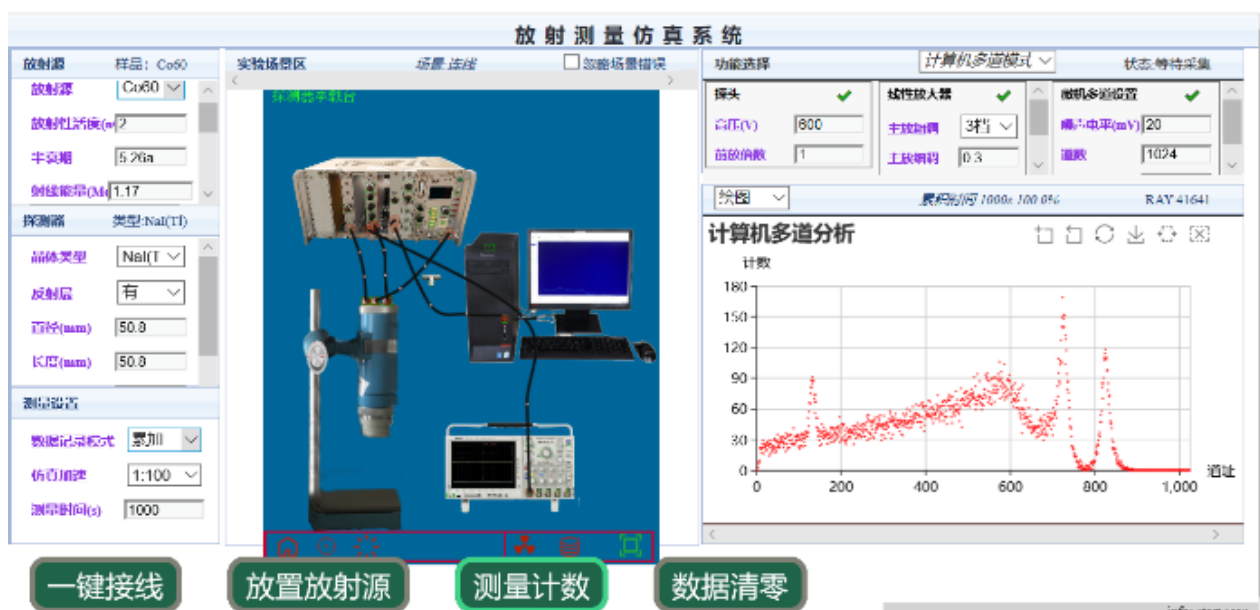


图 5 放射测量仿真系统主界面(多道模式)

Fig. 5 Main interface of radiation measurement simulation system (multi-channel mode)

2.2 混合源或自定义放射源能谱测量

选择不同组合的混合源或自定义放射源, 进行多道测量, 通过道址确定不同作用结果形成的谱峰, 分析时可参考单一放射源的谱峰情况。图 6 为 $4n\text{Ci}$ 的 Cs137 和 $8n\text{Ci}$ 的 Co60 混合源多道能谱测量实验效果图。

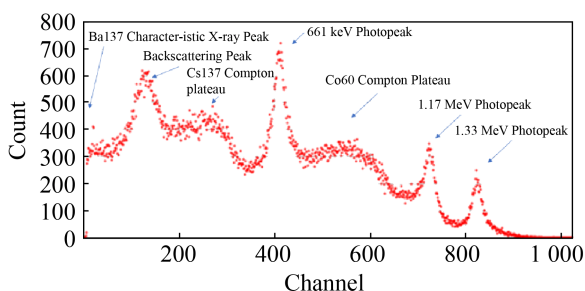


图 6 $4n\text{Ci}$ 的 Cs137 和 $8n\text{Ci}$ 的 Co60 混合源多道能谱测量实验效果图

Fig. 6 Multichannel spectrum measurement of mixed sources of Cs137 ($4n\text{Ci}$) and Co60 ($8n\text{Ci}$)

2.3 防护材料的铅当量和半价层测量

该仿真系统, 对常用防护材料铝、铜、铅进行了建模, 铅当量和半价层的仿真测量, 可以开展不同材料的防护效果测试。防护材料单片厚度为 1 mm , 通过不同材料的组合, 可以实现类似三明治型的防护组合。实验时, 依次增加 1 mm 的防护材料, 经多道测量并计算全能峰面积, 当峰面积下降一半时的材料厚度即为该材料的半价层厚度; 与 1 mm Pb 实现相同的防护性能的材料厚度, 即为 1 mm 铅当量。如图 7 所示为分别放置 $0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21\text{ mm Pb}$ 后的 Co60 能谱实验效果图。分别应用 1.17 MeV 和 1.33 MeV 的峰值和峰面积得到的计数衰减曲线, 均得到 Co 的半价层厚度约为 12 mm , 与理论教材上给出的 Co60 的铅半价层为 12.5 mm 基本吻合。

2.4 不同晶体尺寸的射线测量

常规设备采用的探测器, 灵敏物质的尺寸一般都是固定的。但同种射线在不同尺寸探测器测量下, 输出能谱响应是不同的。本系统可设置不同尺

寸(直径和高度均可调)测量晶体, 模拟小、中、大 3 种尺寸的晶体探测器, 对不同能量的射线进行能谱测量。可观察不同晶体尺寸下的能谱图差异, 也可以观察无反射层的裸晶体下的能谱响应。该功能对于某些核技术应用的探测系统研发可以提供系统设计仿真。

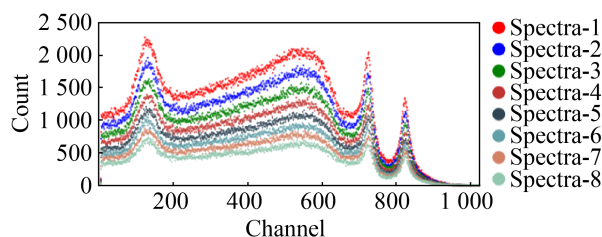
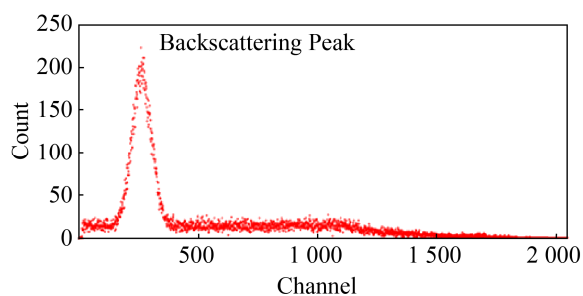


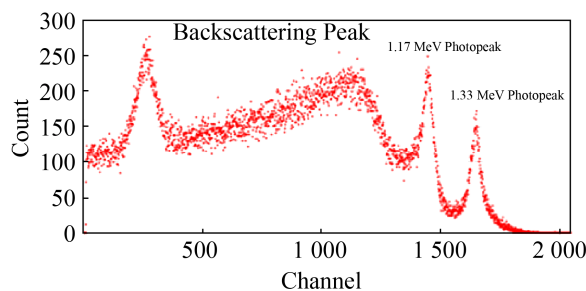
图 7 分别放置 $0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21\text{ mm Pb}$ 后的实验效果图

Fig. 7 Experimental effect of $0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21\text{ mm pb}$

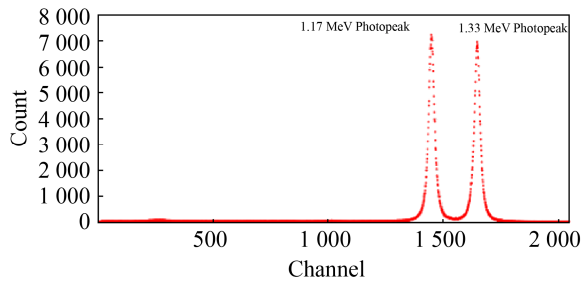
图 8 为分别在 $1, 2, 3$ 英寸晶体下的能谱响应。由图可知, 1 英寸下(可认为是小尺寸晶体), 大量散射光子逸出, 除反散射峰外, 康普顿坪和全能峰几乎没有; 2 英寸(可认为是中小尺寸晶体), 有全能峰和康普顿坪, 说明有部分散射光子逸出; 3 英寸(可认为是大尺寸晶体), 散射光子无法逸出, 最终都形成全能峰, 康普顿坪很低。能谱效果与理论是吻合的。



(a) 1 英寸晶体下 Co60 能谱响应



(b) 2 英寸晶体下 Co60 能谱响应



(c) 3 英寸晶体下 Co60 能谱响应

图 8 Co60 分别在 1, 2, 3 英寸下的能谱响应
Fig. 8 Spectral response of Co60 in 1, 2, 3 inch NaI (Tl) crystal sizes

3 结论

本研究采用 MC 方法, 对放射测量的全过程进行了随机性建模, 并自主开发了计算内核, 并对外硬件系统功能和外观也进行了场景建模, 完成了仿真放射测量系统的研发, 模拟实验结果与理论吻合很好。可应用于放射测量仪器开发、测试校准、探测效率刻度、未知放射源能谱图比对、防护材料的防护性能测试和计算等方面。

另外, 放射线测量在教学实践中通常存在一些困难: ①放射源的使用受限。放射源受到国家环保、公安、卫生等部门的严格管控, 采用申请许可制度, 因此使用资质很难申请, 使得一些开设与放射线相关专业的高校, 存在着无法有效的开展放射性测量相关的实验教学的问题; ②具有电离辐射损伤。放射源电离辐射的特性, 不可避免的对于研究和实验人员造成伤害; ③会受到设备台套数有限、灵敏晶体尺寸规格有限等因素影响。因此使得放射测量系统在射线相关的研发、应用和人才培养的教学实践中受到诸多限制。

该仿真系统可规避实际系统的各种先天不足, 具有安全、高效、高性价比的特性, 可以满足批量化、实操性、线上/线下教学实验。

2020 年初的 Covid-19 疫情爆发, 该仿真系统在影像医学与核医学专业进行了批量化在线实验教学实践和功能迭代, 有效地解决了批量化、操作性的放射测量线上实验教学。虽然在测量系统连线时缺乏对真机的触摸感, 但是优势很明显: ①无电

离辐射危害; ②低成本(相当于一套单道和一套多道放射测量系统的组合, 真机单台价格 20 万左右); ③应用更灵活(可批量化, 可任意更换放射源, 可任意更换晶体尺寸, 可采用混合源或自定义放射源, 可任意增加防护材料等); ④更广的适用范围(后续还可以在医学影像技术、生物医学工程、环境保护、核技术、地质勘探、石油能源等专业开展批量化的操作性放射测量实验教学实践)。

参考文献:

- [1] Malataras G, Kappas C, Lovelock D M J, et al. Simulation with EGS4 Code of External Beam of Radiotherapy Apparatus with Workstation and PC Gives Similar Results[J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* (S0169-2607), 1997, 52(1): 45-51.
- [2] Ma C M. Implementation of a Monte Carlo Code on a Parallel Computer System[J]. *Parallel Computing* (S0167-8191), 1994, 20(7): 991-1005.
- [3] Fayez H H. Al-Ghorabie. Development of a Computer Code Using the EGS4 Monte Carlo Simulation System to Evaluate the Response of a NaI(Tl) Detector to Photons with Energies Below 300 keV[J]. *Applied Radiation and Isotopes* (S0969-8043), 2006, 64(1): 85-92.
- [4] Kenichi M. EGS4V: Vectorization of the Monte Carlo Cascade Shower Simulation Code EGS4[J]. *Computer Physics Communications* (S0010-4655), 1987, 45(1/3): 127-136.
- [5] Kim M, Hong B H, Cho I, et al. Design of a Scintillator-based Prompt Gamma Camera for Boron-neutron Capture Therapy: Comparison of SrI2 and GAGG Using Monte-Carlo Simulation[J]. *Nuclear Engineering and Technology* (S1738-5733), 2021, 53(2): 626-636.
- [6] Chuong H D, Hung N Q, Le N T M, et al. Validation of Gamma Scanning Method for Optimizing NaI(Tl) Detector Model in Monte Carlo Simulation[J]. *Applied Radiation and Isotopes* (S0969-8043), 2019, 149(1): 1-8.
- [7] Elena I, Bernard F, Eric. A γ -ray Background Model for Monte Carlo Simulations[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (S0168-9002), 2007, 579(1): 279-283.
- [8] Shi H X, Chen B X, Li T Z, et al. Precise Monte Carlo Simulation of Gamma-ray Response Functions for an NaI(Tl) Detector[J]. *Applied Radiation and Isotopes*

- (S0969-8043), 2002, 57(4): 517-524.
- [9] 张富利, 曲德成, 杨国山, 等. MC方法在 γ 谱测量中效率刻度的研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2009, 29(4): 432-434,448.
Zhang Fuli, Qu Decheng, Yang Guoshan, et al. An Efficiency Calibration Method without a Radioactive Source Using BOMAB Phantom and Monte Carlo Simulation for Inspector 2000 Gamma Spectroscopy System[J], Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2009, 29(4): 432-434,448.
- [10] 钱雅兰, 王德忠, 顾卫国, 等. 核废物桶检测中探测效率的数值方法[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(1): 1-5.
Qian Yalan, Wang Dezhong, Gu Weigu, et al. Numerical Method of Detection Efficiency for Radioactive Waste Drum Detection[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2017, 51(1): 1-5.
- [11] 许阳阳, 虞先国, 石睿, 等. PIPS- α 谱仪探测效率 MC模拟及其影响因素[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(10): 151-156.
Xu YangYang, Tuo Xianguo, Shi Rui, et al. Monte Carlo Simulation and Influencing Factors of Detection Efficiency of PIPS- α Spectrometer[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(10): 151-156.
- [12] 钟丁生, 钟经华, 蔺利利, 等. MC法模拟 G-M 计数管材料的能量沉积特性研究[J]. 核电子学与探测技术, 2019, 39(4): 529-531.
Zhong Dingsheng, Zhong Jinghua, Lan Lili, et al. Research on Simulation of Material-Energy Deposition Characteristics of G-M Counter Tube by MC Method[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2019, 39(4): 529-531.
- [13] 张明, 王仁仲, 杨元第, 等. MC方法模拟放射源位置对井型 NaI(Tl)晶体探测效率的影响[J]. 核电子学与探测技术, 2012, 32(1): 50-53.
Zhang Ming, Wang Renzhong, Yang Yuandi, et al. Influence of the Source Position to the Well-type NaI(Tl) Detection Efficiency Based on a Monte Carlo Simulation [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2012, 32(1): 50-53.
- [14] 张文利, 屈国普, 赵越, 等. 基于点源模拟法的体源全能峰符合效率实验研究[J]. 核技术, 2020, 43(1): 43-47.
Zhang Wenli, Qu Guopu, Zhao Yue, et al. Experimental Study on Coincidence Efficiency of Volume Source Omnipotence Peak Based on Point Source Simulation[J]. Nuclear Techniques, 2020, 43(1): 43-47.
- [15] 田自宁, 欧阳晓平. 大面积及大体积放射源 HPGe 探测器效率刻度[J]. 现代应用物理, 2015, 6(1): 1-7,19.
Tian Zining, Ouyang Xiaoping. Efficiency Calibration of HPGe Detectors for Large Disk and Volume Radioactive Sources[J]. Modern Applie Physics, 2015, 6(1): 1-7,19.
- [16] 吴祥余. 不同尺寸 γ 射线探测器响应函数及探测效率的蒙特卡罗模拟[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
Wu Xiangyu. The Simulation of Response Function and Detection Efficiency for γ -ray Cetector of Different Sizes by Monte Carlo Method[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.