

doi: 10.7690/bgzdh.2022.02.011

基于 Geant4 的 GM 计数管探测效率模拟

田伟^{1,2}, 朱海龙², 法峰³, 武慧恩⁴, 诸雪征¹(1. 陆军防化学院, 北京 102205; 2. 防化装备部防化军代局驻北京地区防化军代室, 北京 102205;
3. 中国人民解放军 32381 部队, 北京 100086; 4. 防化装备部防化军代局驻太原地区防化军代室, 太原 030000)

摘要: 为提高 GM 计数管的应用水平, 基于 Geant4 软件设计 GJ4105 型 GM 计数管的探测效率模拟程序。通过实测灵敏度对模拟程序的正确性进行验证, 依据模拟的探测效率结果计算的灵敏度与实测灵敏度偏差仅为 0.5%。结果表明: Geant4 的模拟结果可靠, 可为 GM 计数管的设计提供一种行之有效、方便快捷的模拟手段。

关键词: GM 计数管; Geant4; 探测效率; 灵敏度

中图分类号: TJ91 **文献标志码:** A

Simulation Study on Detection Efficiency of GM Tube Based on Geant4

Tian Wei^{1,2}, Zhu Hailong², Fa Feng³, Wu Huien⁴, Zhu Xuezheng¹(1. Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China; 2. Military Representative Office in Beijing District, Chemical Defense Military Representative Bureau, Chemical Defense Armament Ministry of PLA, Beijing 102205, China;
3. No. 32381 Unit of PLA, Beijing 100086, China; 4. Military Representative Office in Taiyuan District, Chemical Defense Military Representative Bureau, Chemical Defense Armament Ministry of PLA, Taiyuan 030000, China)

Abstract: In order to improve the application level of GM counter, the detection efficiency simulation program of GJ4105 GM counter was designed based on Geant4 software. The correctness of the simulation program is verified by the measured sensitivity, and the deviation between the calculated sensitivity based on the simulated detection efficiency and the measured sensitivity is only 0.5%. The results show that the simulation results of Geant4 are reliable, which can provide an effective and convenient simulation method for the design of GM counter.

Keywords: GM counter; Geant4; detection efficiency; sensitivity

0 引言

GM 计数管是一种常用的核辐射探测器^[1], 自问世以来, 以其制造简单、性价比高、环境适应性好、输出脉冲幅度大、易于操作等突出特点, 成为目前应用最为广泛的核辐射探测器^[2]。GM 计数管数值模拟研究主要是基于蒙特卡罗法, 对 GM 计数管进行优化设计, 最终目的是提高 GM 计数管的应用水平, 减少大量重复性试验工作。目前, 研究最多的是计数管能量响应的研究^[3-4], 解决低能段的过响应问题, 通常是基于裸管的能量响应情况和能响补偿理论, 调整屏蔽材料的几何尺寸和形状, 从而综合计算最佳的补偿条件^[5-8], 而通过蒙特卡罗法研究 GM 计数管探测效率方面的研究鲜有文献报道。笔者采用 Geant4 软件工具, 设计 GJ4105 型 GM 计数管的探测效率模拟仿真程序。

1 GJ4105 型 GM 计数管基本参量

GJ4105 型 GM 计数管对 ¹³⁷Cs 的实测灵敏度约为 1 cps/ μ Svh⁻¹, 其阳极和阴极均为金属材料, 两端

采用陶瓷密封, 其剖面结构尺寸如图 1 所示。

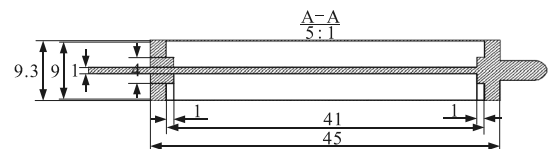


图 1 GJ4105 型计数管剖面结构尺寸

GJ4105 型 GM 计数管主要由阴极管、阳极丝、玻璃管、陶瓷和填充气体等材料组成, 各材料组成元素如表 1^[9]所示。表中: Z_{eff} 为有效原子序数; 陶瓷和玻璃由于对计算没有影响, 故没有纳入。

表 1 GJ4105 材料组成

材料名称	元素	重量比/%	密度/(g/cm ³)	Z_{eff}
阴极	Fe	70.18	7.55	25.94
	Cr	28.47		
	Si	0.47		
	Mn	0.37		
	V	0.18		
	其他	0.25		
阳极	Fe	69.40	7.40	25.88
	Cr	28.40		
	Si	1.40		
	其他	0.80		
填充气体	Ne	99.50	0.000 1	10.12
	Br	0.50		

收稿日期: 2021-12-14; 修回日期: 2021-12-24

作者简介: 田伟(1979—), 男, 山东人, 博士, 高级工程师, 从事气体辐射探测器应用研究。E-mail: tianwww2021@126.com。

2 Geant4 模拟计数管探测效率的实现

Geant4 是欧洲核子中心所主导设计的一套用于仿真粒子在物质中传输过程的开源蒙特卡罗工具包^[5]，主要由管理模块以及一套与之对应的应用组成，管理模块包括物理过程模块，结构外形模块，运行、事件、轨迹管理模块，追踪管理模块，碰撞和数字模块，可视化 and 用户接口模块^[6]。通过 Geant4 软件，模拟射线打到 GM 计数管之后，与计数管结构材料发生作用，在计数管的灵敏体积内(气腔内)有没有产生电子，产生电子射线数量与通过计数管灵敏体积射线数量的比值就是计数管的探测效率。

Geant4 仿真程序设计过程如下：定义 GM 计数管几何尺寸及材料；定义电场；定义射线及其位置；计算绝对灵敏度和探测效率。

在搭建好 Geant4 平台后，按照探测器 GJ4105 型 G-M 计数管结构模型参数(图 1)，指定放射源和物质作用过程，利用 Geant4 软件构建了模拟中的探测器模型。阳极丝、阴极壳、气体成分见表 1。由于 GM 计数管内部气体为负压，与计数管阴阳极相比，相对密度可以忽略不计；因此在 Geant4 软件仿真计算中，不考虑内部气体成分的影响。

仿真采用场景+代码方法，分别将气体内光电效应电子、进入气体内电子和达到阴极壁光子进行区别探测事例抓取，进行物理信息抽取，判断是否在气体腔中产生电子，将电子信息返回给 Event，将得到的电子信息输出到文件，存储探测到的所有电子信息，包括个数、能量及位置分布，然后进行信息汇总和分析。抓取探测事例信息如图 2、3 所示。

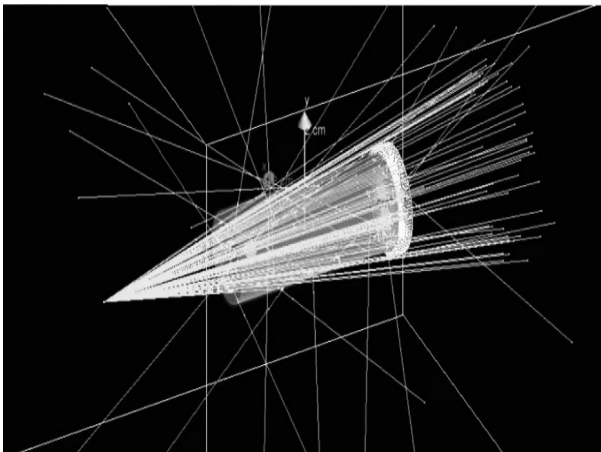


图 2 抓取探测事例信息

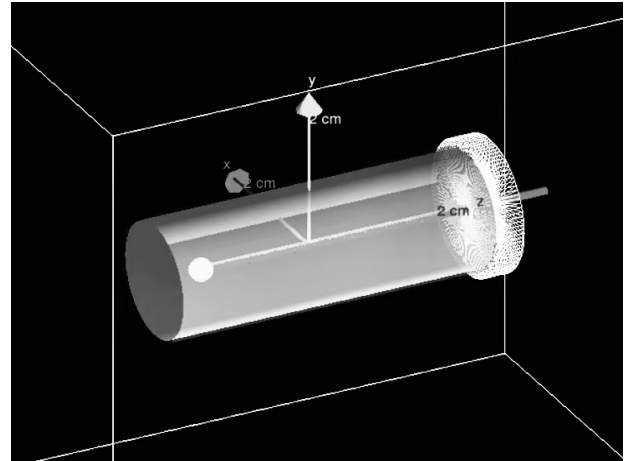


图 3 抓取探测事例信息(局部放大)

当射线穿过 GM 计数管时，若在填充气体中产生了电子，则记录其能量和位置，视为“探测到该射线”，即为 GM 计数管的探测效率。绝对灵敏度定义是射线距离计数管一定位置，打到计数管上产生电子的射线与射线总数的比值。

当模拟每个事例 Event 时，不断询问当前 step(Geant4 模拟中的最小单元)的粒子属性是否为 e⁻：如果是，判断当前所处位置，如果处于灵敏区(填充气体)当中，则将当前的位置、能量传递给预先定义好的存储变量，用以记录当前 Event 为有效探测事例。若当前任务跑完，可以输出直方图存储的有效事例总数、打到阴极表面的射线总数，以及对应的探测效率和绝对灵敏度。

通过 Geant4 建模计算后，1 000 000 个射线，打入灵敏体积的 γ 射线数为 199 085，在灵敏体积内产生电子 464 个，计算 GJ4105 的探测效率为 0.233%。

3 正对模拟仿真结果的验证

已知计数管的探测效率，可以计算出其灵敏度，具体计算方法和过程如下：

假设 ¹³⁷Cs 放射源从计数管的一侧平行入射，在计数管处的环境剂量率为 1 μGy/h。依据图 1，计算 GJ4105 的内表面面积为 11.58 cm²，由于射线从一侧射入，所以实际照射面积为内表面面积的一半，即 5.79 cm²。注量 Φ 到单能光子自由空气比释动能 Ka 的转换系数 K 为 3.112 pGy·cm²^[1]。

¹³⁷Cs 的粒子注量率 Φ_{Cs-137} 由下式得出：

$$\Phi_{Cs-137} = K_a / K = (1 \mu\text{Gy/h}) / (3.112 \text{ pGy} \cdot \text{cm}^2) = 89.26 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \tag{1}$$

所以 GJ4105 在 ¹³⁷Cs 放射源从一侧入射，在

剂量率 1 $\mu\text{Gy/h}$ 条件下, 产生的计数率由下式计算得出:

$$C = \Phi_{\text{Cs-137}} \times \text{Sa} \times \text{De} \quad (2)$$

其中: C 为计数率, cps; Sa 为截面面积, cm^2 ; De 为探测效率。

将各参量代入式(2), 计算在 1 $\mu\text{Gy/h}$ 剂量场中 GJ4105 的计数率为 1.204 s^{-1} 。这就是 GJ4105 的灵敏度。由于计算过程中用的单位是 Gy/h , 换算成吸收剂量单位 Sv/h , 对 ^{137}Cs 要除以转换系数 1.21, 所以计算得出 GJ4105 的灵敏度为 $0.995 \text{ cps}/\mu\text{Svh}^{-1}$ 。

计算结果与实测灵敏度偏差仅为 0.5%, 说明 Geant4 模拟仿真结果是正确的。

4 结束语

笔者基于 Geant4 软件, 设计 GJ4105 型计数管的探测效率仿真程序。通过对仿真结果的验证, 证明了仿真程序的可靠性和正确性, 从而降低了设计成本, 提高了产品开发效率。该仿真程序可为 GM 计数管的设计提供一种行之有效、方便快捷的模拟仿真手段。

参考文献:

- [1] 李志远. 用于 X/γ 射线剂量率测量的厚 GEM 探测器研究[D]. 北京: 军事科学院, 2020.
- [2] 凌球, 郭兰英. 核辐射探测[M]. 北京: 原子能出版社, 1992: 92-96.
- [3] 王文炜. 蒙特卡罗方法在 GM 计数管优化设计中的应用研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2011.
- [4] 李志远, 郑永春, 张皓, 等. 一款 G-M 计数管能量响应补偿软件的研究[J]. 核电子学与探测技术, 2012, 32(12): 1385-1387, 1457.
- [5] 林木. 基于 Geant4 的正比计数器氙测量方法优化研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- [6] 龚玉巍, 刘明健, 张燕, 等. 基于 Geant4 的 G-M 计数管能量补偿研究[J]. 核电子学与探测技术, 2011, 31(8): 912-915.
- [7] 王成竹, 张佳, 侯磊, 等. GM 计数管能量响应补偿的 MC 法模拟[J]. 核电子学与探测技术, 2016, 36(1): 87-90.
- [8] 王玲, 韩刚, 杨磊, 等. G-M 计数管能量响应的蒙特卡罗模拟及优化设计[J]. 核电子学与探测技术, 2011, 31(1): 44-47, 66.
- [9] MERIC I, JOHANSEN G A, HOLSTAD M B, et al. A single scatter electron Monte Carlo approach for simulating gamma-ray stopping efficiencies of Geiger-Müller counters[J]. Nuclear Instruments And Methods in Physics Research Section A, 2011, 654(1): 279-287.
- [10] 控制方法及其在滚珠丝杠磨削中的应用[J]. 机械工程学报, 2002(4): 100-102.
- [11] 杨娅军, 周泽魁. 传动带成形机上智能型放卷张力控制器及应用[J]. 中国机械工程, 2004(5): 384-387.
- [12] 周承仙, 富巍. 基于前馈控制与反馈控制的位置伺服研究[J]. 火力与指挥控制, 2016(12): 162-164.
- [13] 黄维新, 姚瑶. 全闭环数控回转轴定位精度研究[J]. 机电工程, 2013(12): 1481-1484.
- [14] 中国兵器工业集团公司. 兵器工业爆炸危险环境电气安全技术条件: WJ2566—2007[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2001: 2.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 爆炸性环境: 第 15 部分电气装置的设计、选型和安装: GB/T3836.15—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 12.

[1] 李志远. 用于 X/γ 射线剂量率测量的厚 GEM 探测器研

(上接第 34 页)

- [4] 李友军. EtherCAT 工业以太网应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020: 1-9.
- [5] BUTTNER H, JANSEN D. Real-Time Ethernet the EtherCAT solution[J]. Computing & Control Engineering Journal, 2004, 15(1): 16-21.
- [6] 傅磊. PLC 结构化文本编程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2021: 6-7.
- [7] 陈娟, 周猛, 薛钧义. 面向对象的程序设计方法在 PLC 程序设计中的应用[J]. 电气自动化, 2001(3): 55-57.
- [8] 吉星. C 高级编程: 基于模块化设计思想的 C 语言开发[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 497-503.
- [9] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 252-288.
- [10] 宋现春, 林明星, 张承瑞, 等. 误差输入前馈控制补偿