

基于有限点源的航空核辐射污染场模拟方法研究

李子钡

成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2024年3月23日; 录用日期: 2024年3月29日; 发布日期: 2024年4月28日

摘要

为建立大范围航空核辐射污染场实验平台, 本文提出一种基于点源的无限大面源模拟方法。利用蒙特卡罗模拟软件, 建立点源距离 - 探测效率响应函数, 将无限大面源以网格划分, 基于积分中值定理, 建立点源 - 圆形线源 - 网格面源的等效转换函数, 以此为基础, 建立等效点源分布模型。蒙特卡罗模拟结果表明: 探测器对等效点源分布模型和无限大均匀面源的全能峰响应相对误差为1.10%; 物理实验结果表明: 探测器对等效点源分布模型和无限大均匀面源的全能峰响应相对误差为1.79%。

关键词

核辐射污染场, 无限大面源模拟

Study on Simulation Method of Airborne Nuclear Radiation Contamination Field Based on Finite Point Source

Zikun Li

The College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Received: Mar. 23rd, 2024; accepted: Mar. 29th, 2024; published: Apr. 28th, 2024

Abstract

In order to establish an experimental platform of large-scale nuclear radiation contamination field for airborne radiation measurement, an infinite surface source simulation method based on point source is proposed in this paper. Monte Carlo simulation software was used to establish the point

source range-detection efficiency response function, and the infinite surface source was divided into grids. Based on the integral mean value theorem, the equivalent conversion function of point source-circular line source-grid was established. On this basis, the equivalent point source distribution model was established. Results obtained by the Monte Carlo simulation show that the relative deviation between the total peak response of the detector through the equivalent point source distribution model and the infinite uniform surface source is 1.10%, and the experimental results show that the relative deviation between the total peak response of the detector through the equivalent point source distribution model and the infinite uniform surface source is 1.79%.

Keywords

Nuclear Radiation Contamination Field, Infinite Uniform Surface Source Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

世界的局势正处于风云变幻之中，俄乌战争不断升级，核战争的风险也在上升。与此同时，乌克兰境内的扎波罗热核电站屡次遭受袭击，给人类社会带来了巨大的安全威胁。这一系列事件引发了人们对于核安全的担忧，核与辐射安全面临新的挑战[1]。针对核安全和辐射安全存在的隐患，采取有效对策，进一步提高我国核与辐射安全的保障水平至关重要。面对核爆和核泄漏所产生的人工放射性核辐射污染场，需要在较短时间内确定污染场的边界范围和被测区域核辐射分布情况[2]。目前国内较大范围的体源主要是放射性勘察计量站的标准模型，由天然矿石混合制成，大部分是 ^{40}K 、铀系、钍系等天然核素。尚未见有针对核爆或核电站泄漏所造成的大范围辐射污染场的场地[3]。为了研究人工放射性核辐射污染场，需要建立人工放射性核素污染场模型，以便更好地对此进行研究。在航测条件下所需的面源面积较大(直径通常为8.5倍的飞行高度)，为此，在地面以有限数量点源模拟无限大面源污染场。

现有研究成果多基于数值积分法，刘新华等人将面源依角度和半径划分为不同大小的微元，在微元中心放置 ^{137}Cs 点源获取各微元的角响应，利用三种数值积分方法得到1.22 m高航空 γ 谱仪对半无限大平面源的探测效率[4]；核工业航测遥感中心分别制作了8块 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 等腰梯形平面源(组成边长为1 m的正六边形)，依据 γ 场叠加原理多次拼接可组成近似无限大面源，基于介质互换原理使用木板代替空气得到120 m高度下航空 γ 谱仪的探测效率值[5]。但航空测量在大范围测量时精度不高，无法准确得知某一位置的辐射剂量，点源与所代表微元部分活度并不相等。

针对上述问题，本文设计了一种基于有限点源模拟的面源方法。利用蒙特卡罗方法，模拟了探测器探测效率随点源和圆形线源距离的变化曲线，基于积分中值原理确定点源摆放的位置，确保单个点源与对应面源微元部分活度相等，所有点源与面源活度相等，并使用模拟数据验证了模型的有效性。

2. 理论基础

航空核辐射侦察装置对地测量的视野为对地面的一个圆形区域，地表的核辐射污染场相对于航空核辐射侦察装置可视为无限大面源，由核辐射测量的独立性可知[6]，圆形面源可视为无限多个微分环状面源叠加所得，环状面源可视为无限多个圆形线源叠加所得，圆形线源可视为无限多个点源叠加所得。

2.1. 圆形线源 - 无限大面源等效模型

如图 1 所示, 将面源划分为多个环型面源, 每个环型面源对探测器的贡献可看作是多个圆形线源对探测器贡献之和, 每个圆形线源看作是多个点源对探测器贡献之和。对于面源产生的全能峰响应 f , 如式(1)所示, 根据“微元法”将面源划分, 对于面源产生的全能峰响应可以认为等于各圆环面源产生的全能峰响应之和, 圆环面源可视为圆形线源的积分, 对于圆环面源产生的全能峰响应 $f_{环i}$, 如式(2)所示。

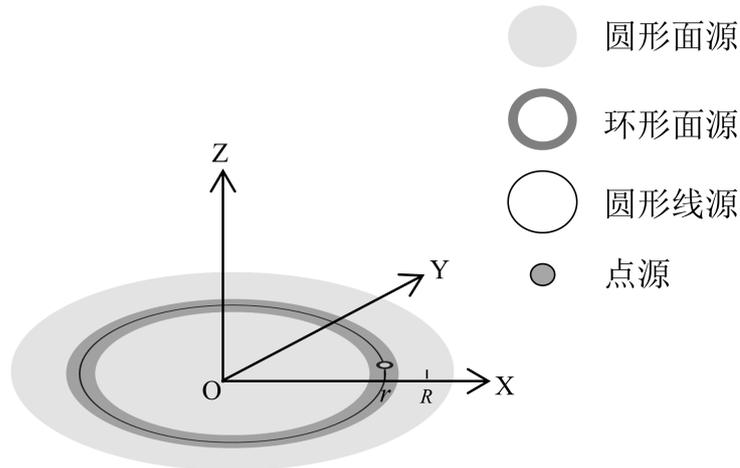


Figure 1. Schematic diagram of ring integration
图 1. 圆环积分示意图

$$f = \varepsilon_{面} AS_{面} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{环i} AS_{环i} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} f_{环i} &= \varepsilon_{环i} AS_{环i} = \int_{r_{i-1}}^{r_i} \varepsilon_{圆}(r) 2\pi r A_{圆} dr \\ &= \varepsilon_{圆}(r_0) 2\pi r_0 A_{圆} (r_i - r_{i-1}) \\ &= \varepsilon_{圆}(r_0) AS_{环i} \\ &= \varepsilon_{点}(r_0) AS_{环i} \end{aligned} \quad (2)$$

式(1)中: $\varepsilon_{面}$ 为探测器对面源的探测效率; $S_{面}$ 为面源面积; A 为面源比活度; $S_{环i}$ 为环形面源面积; $\varepsilon_{环i}$ 为探测器对环形面源的探测效率。

式(2)中: $\varepsilon(r)$ 为探测器对半径为 r 处单位活度源的探测效率; $\varepsilon_{圆}$ 为探测器对圆形线源的探测效率; $\varepsilon_{点}$ 为探测器对点源的探测效率; r_0 为积分中值点所在半径; $A_{圆}$ 为圆形线源比活度。

2.2. 圆形线源 - 无限大面源等效模型

点源 - 圆环 - 无限大面源等效模型无法构建不均匀无限大面源, 因此, 将圆环改为方格, 将面源划分为若干方格, 实现点源 - 方格 - 无限大面源等效模型, 以达到构建不均匀无限大面源的目的。

如图 2 所示, 将面源划分为多个方格面源, 每个方格面源对探测器的贡献可看作是各段圆弧线源对探测器贡献的积分, 每个圆弧线源看作是多个点源对探测器贡献的积分, 对于面源产生的全能峰响应 f , 如式(3)所示。利用积分中值定理, 得到点源摆放处所在半径, 则方格面源产生的全能峰响应 $f_{方格i}$, 如式(4)所示。

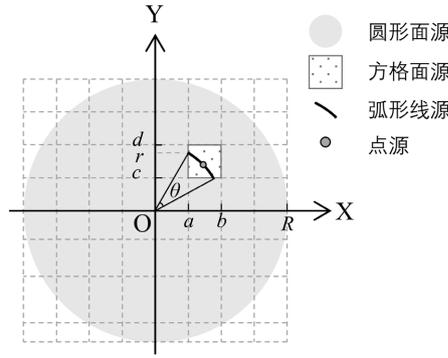


Figure 2. Schematic diagram of grid integration
图 2. 方格积分示意图

$$f = \varepsilon_{\text{面}} AS_{\text{面}} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{\text{方格}i} AS_{\text{方格}i} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} f_{\text{方格}i} &= \varepsilon_{\text{方格}i} AS_{\text{方格}i} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \varepsilon_{\text{圆}}(r) \theta(r) A_{\text{圆}} r dr \\ &= \varepsilon_{\text{圆}}(r_0) \theta(r_0) A_{\text{圆}} r_0 (r_{\max} - r_{\min}) \\ &= \varepsilon_{\text{圆}}(r_0) AS_{\text{方格}i} \\ &= \varepsilon_{\text{点}}(r_0) AS_{\text{方格}i} \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中： $\theta(r)$ 为半径为 r 时，弧形线源所对应的角度。

对于面源内任意一个方格，圆弧长度的求解有三种情况，令点 O 为晶体中心在地面的垂直对应点，将半径为 r 的面源均匀地划分为若干个方格，如图3所示。

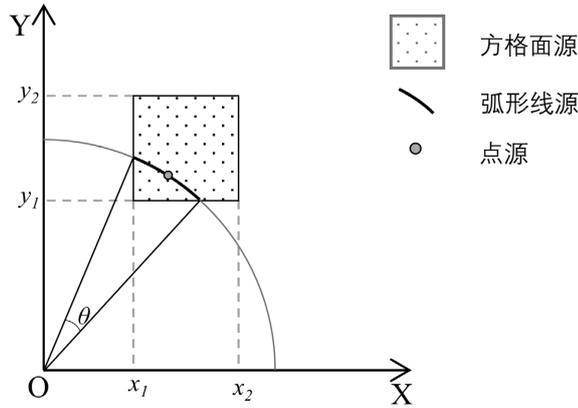


Figure 3. Schematic diagram of grid integral geometry
图 3. 方格积分几何关系示意图

任意方格四条边的方程为 $x = a, x = b (b > a); y = c, y = d (d > c)$ ；圆弧与方格交点坐标取值范围： $a \leq x \leq b, c \leq y \leq d$ ；圆弧与方格的交点坐标为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) ；圆弧对应的角度为式(5)；圆弧占整圆的比例为 $\theta/2\pi$ ；在任意方格内，圆弧的半径有四种情况：① $|x|$ 和 $|y|$ 都取最大值时，此时半径 r 为 r_{\max} ；② $|x|$ 取最大值， $|y|$ 取最小值时，此时半径 r 为 r_x ；③ $|x|$ 取最小值， $|y|$ 取最大值时，此时半径 r 为 r_y ；④ $|x|$ 和 $|y|$ 取最小值时，此时半径 r 为 r_{\min} ，由此得到三种情况下的方格内弧形线源对探测器的贡献，如公式(6)所示：

$$\theta = \left| \arcsin \frac{y_2}{r} - \arcsin \frac{y_1}{r} \right| \quad (5)$$

$$\begin{aligned} f_{\text{方格}} &= \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \varepsilon_{\text{圆}}(r) \theta(r) A_{\text{圆}} r dr \\ &= \int_{r_{\min}}^{r_x} \varepsilon_{\text{圆}}(r) \left| \arcsin \frac{\sqrt{r^2 - a^2}}{r} - \arcsin \frac{c}{r} \right| A_{\text{圆}} r dr \\ &\quad + \int_{r_x}^{r_y} \varepsilon_{\text{圆}}(r) \left| \arcsin \frac{\sqrt{r^2 - a^2}}{r} - \arcsin \frac{\sqrt{r^2 - b^2}}{r} \right| A_{\text{圆}} r dr \\ &\quad + \int_{r_y}^{r_{\max}} \varepsilon_{\text{圆}}(r) \left| \arcsin \frac{d}{r} - \arcsin \frac{\sqrt{r^2 - b^2}}{r} \right| A_{\text{圆}} r dr \end{aligned} \quad (6)$$

3. 蒙特卡罗模拟验证

实验选择 superMC 来对点源等效模型进行模拟验证, 探测器为 $\phi 45 * 51$ mm 圆柱形溴化铯, 此时探测器高度 h 为 11.93 m, 圆形面源半径 r 为 4.95 m, 结合式(4)与式(6)得到方格等效模型点源位置, 如图 4 所示; 蒙卡模拟方格与等效点源相对误差如表 1 所示。

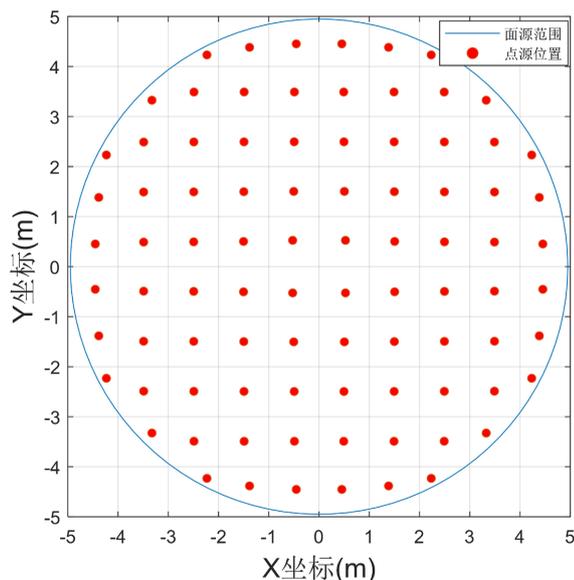


Figure 4. Equivalent point source location
图 4. 等效点源位置

Table 1. Simulation results of equivalent point source
表 1. 等效点源模拟验证结果

源项	等效点源与对应网格面源相对误差		全能峰计数		整体相对误差(%)
	最大(%)	最小(%)	圆形面源	等效点源模型	
$^{137}\text{Cs}, 0.661$ MeV	2.80	0.03	4043595 ± 2011	4088164 ± 2022	1.10

利用蒙卡模拟探测器高度 12.24 m, 方格边长 1 m, 模拟均匀面源与点源 - 方格等效模型整体相对误差为 1.10%, 单个方格面源最大误差为 1.78%, 最小误差为 0.03%。

4. 物理实验验证

为验证点源 - 方格 - 无限大面源等效模型的模拟效果, 开展点源等效物理实验, 设计了一套航空辐射场模拟装置, 该装置由放射源支架和探测器升降平台等组成。探测仪器为 $\phi 45 \times 51$ mm 圆柱形溴化铯。探测器固定于升降平台之上, 升降平台可在 1.5~2 m 范围内升降, ^{137}Cs (1.648×10^8 Bq) 放射点源安装于放射源架上, 多个不同高度放射源支架用于调节放射源高度, 放射源支架上方可放置屏蔽材料, 用来等效一定厚度的空气。具体实验模型如图 5 所示。

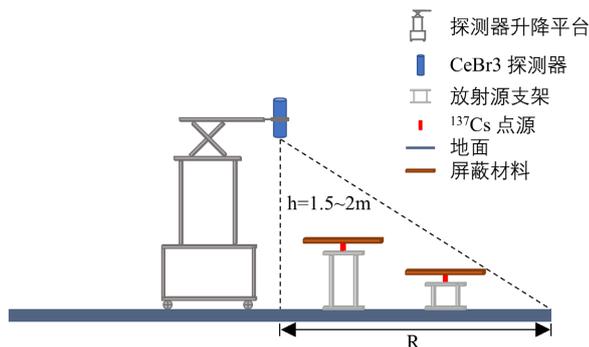


Figure 5. Point source equivalent physics experiment
图 5. 点源等效物理实验

点源等效物理实验中, 平面源半径为 4.95 m, 网格边长为 1 m, 点源等效位置如图 4 所示, 单位测量时间为 1 min, 调整探测器高度为 2 m, 将放射源置于水平地面与探测器之间无遮挡一侧, 为与上文中蒙特卡罗模拟结果进行对比, 使实验模型高度与蒙卡模型一致, 经过实验测量, 铝板对于 0.661 MeV 的伽马射线的线衰减系数为 0.206274 cm^{-1} , 对伽马射线的衰减效果等效于 1986.36 倍厚度的空气, 为达到等效空气衰减高度为 9.93 m, 故选用厚度为 5 mm 铝板作为屏蔽材料。将 $300 \times 300 \times 5$ mm 的铝板放置于放射源支架上方。

Table 2. Simulation results of equivalent point source experiment
表 2. 等效点源实验验证结果

源项	等效点源实验结果与对应网格面源模拟结果相对误差		全能峰计数		整体相对误差(%)
	最大(%)	最小(%)	圆形面源模拟结果	等效点源模型实验结果	
^{137}Cs , 0.661 MeV	3.11	0.18	4043595 ± 2011	4116023 ± 2029	1.79

将实验测量点源数据与圆形面源蒙卡模拟结果进行对比(见表 2), 两者整体相对误差为 1.79%, 单个网格面源最大误差为 3.11%, 最小误差为 0.18%。经实验验证, 等效模型可构建任意活度的平面源。

5. 结论

采用微元法和积分中值定理, 对无限大面源利用有限点源进行等效替代, 得出以下三点结论: 1) 通过积分的方式构建了点源 - 方格 - 无限大面源等效模型; 2) 利用蒙特卡罗方法对无限大均匀面源等效模型进行了模拟验证, 相对误差为 1.10%; 3) 利用点源等效物理实验对无限均匀面源等效模型进行了模拟验证, 相对误差为 1.79%。本文所提出的基于有限点源的航空核辐射沾染场模拟方法, 可在实验室条件下精确实拟航空核辐射沾染场均匀面源。但此方法也存在一定的局限性, 对于大气中氡气和核事故放射

性落下灰等因素对航空测量的影响暂时没有考虑，后续的研究中将进一步对方法进行改进。

参考文献

- [1] Shi, W., Machida, M., Yamada, S., *et al.* (2023) LASSO Reconstruction Scheme for Radioactive Source Distributions inside Reactor Building Rooms with Spectral Information and Multi-Radionuclide Contaminated Situations. *Annals of Nuclear Energy*, **184**, Article ID: 109686. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2023.109686>
- [2] 岳会国. 辐射应急监测技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [3] 葛良全. 航空伽马能谱探测技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [4] 刘新华, 张永兴, 顾仁康, 等. NaI(Tl)航测谱仪对 ^{137}Cs 模拟面源的刻度[J]. 中国核科技报告, 2000: 170-180.
- [5] 胡明考, 张积运, 王新兴, 等. 木板模拟空气吸收伽玛射线试验介绍[C]//中国环境科学学会核安全与辐射环境安全专业委员会, 中国核学会辐射防护分会, 中华医学会放射医学与防护学分会, 中华预防医学会放射卫生专业委员会, 中国毒理学会放射毒理专业委员会. 第三次全国天然辐射照射与控制研讨会论文集. 2010: 6.
- [6] 汤彬. 核辐射测量原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2011: 438.