

# 辐射场重构方法验证

刘铭

2021 年 5 月 25 日

# 目录

|                        |          |
|------------------------|----------|
| <b>1 辐射场重构方法影响因素研究</b> | <b>1</b> |
| 1.1 源项数量对辐射场重构效果的影响    | 1        |
| 1.2 空间状况对辐射场重构效果的影响    | 3        |
| 1.3 测量点数据对辐射场重构效果影响    | 5        |
| <b>2 辐射场重构方法比较</b>     | <b>6</b> |
| 2.1 辐射场重构相对偏差比较        | 6        |
| 2.2 辐射场重构时间比较          | 8        |
| <b>3 本章小结</b>          | <b>9</b> |

## 1 辐射场重构方法影响因素研究

本研究分别对简单空间单源辐射场、简单空间多源辐射场、带有屏蔽空间单源辐射场、带有屏蔽空间多源辐射场分别进行 Geant4 模拟，下面分别将源项数量、辐射场空间状况以及测量点数据为因变量，测评本论文提出的辐射场重构方法效果。

Geant4 模拟主要分为初始化和运行：初始化为模拟的参数进行定义，包括 1) 定义几何体 2) 设置物理过程 3) 定义发射粒子；运行为 Geant4 代码执行时，Geant4 内核所执行的具体内容，包括 1) 导入几何体结构 2) 循环执行 Event(Event 为 Geant4 中粒子发射)。其中，对于不同辐射场的初始化，本研究都设置相同的物理过程，即仅考虑电磁相互作用，电磁相互作用主要包含以下物理过程：光电效应、康普顿效应、电子对效应、韧致辐射、瑞利散射等。对于 Geant4 的几何体定义和粒子源设置，在下面不同影响因素研究中分别进行介绍。

## 1.1 源项数量对辐射场重构效果的影响

为探究源项数量对辐射场重构效果的影响，本论文分别对单源和多源情况分别进行 Geant4 模拟。

对于简单空间单源辐射场，整体辐射场空间设置为  $3m \times 4m \times 5m$  的立方体三维空间，辐射场材料设置为空气，几何体仅设置  $50mm \times 50mm \times 50mm$  的 CsI 材料进行探测，粒子源设置为能量为  $0.662MeV$  的  $^{137}Cs$  点源，点源位置设置在空间几何中心。对于简单空间多源辐射场，几何体也仅设置  $50mm \times 50mm \times 50mm$  的 CsI 材料，粒子源设置将分别定义三个位置不同的点源，分别为能量为  $0.662MeV$  的  $^{137}Cs$  点源，位置设为  $(-1.03m, -1.38m, -2.02m)$ ；能量为  $0.835MeV$  的  $^{54}Mn$  点源，位置设在  $(-1.03m, 1.57m, -1.72m)$  以及能量为  $0.662MeV$  的  $^{137}Cs$  点源，位置设为  $(0.93m, 0.57m, 1.32m)$ 。Geant4 模拟可视化效果如图 1 所示。

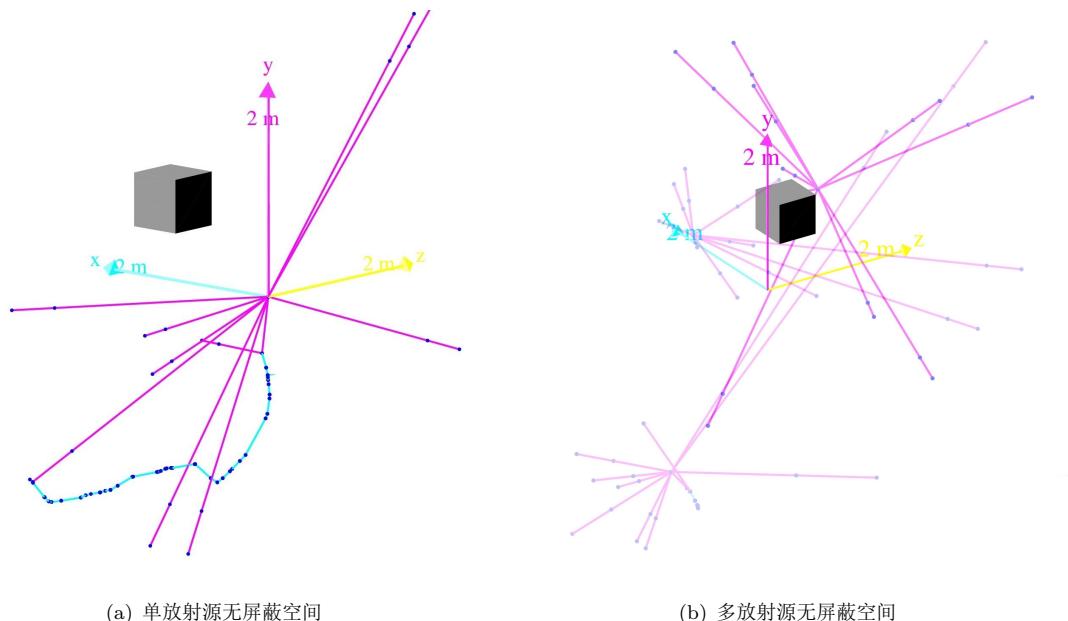


图 1: Geant4 模拟单源辐射场和多源辐射场

通过 Geant4 框架分别对单源无屏蔽辐射场和多源无屏蔽辐射场进行模拟仿真，获得空间辐射场数

据使用 ROOT 绘制, 如图 2 所示。

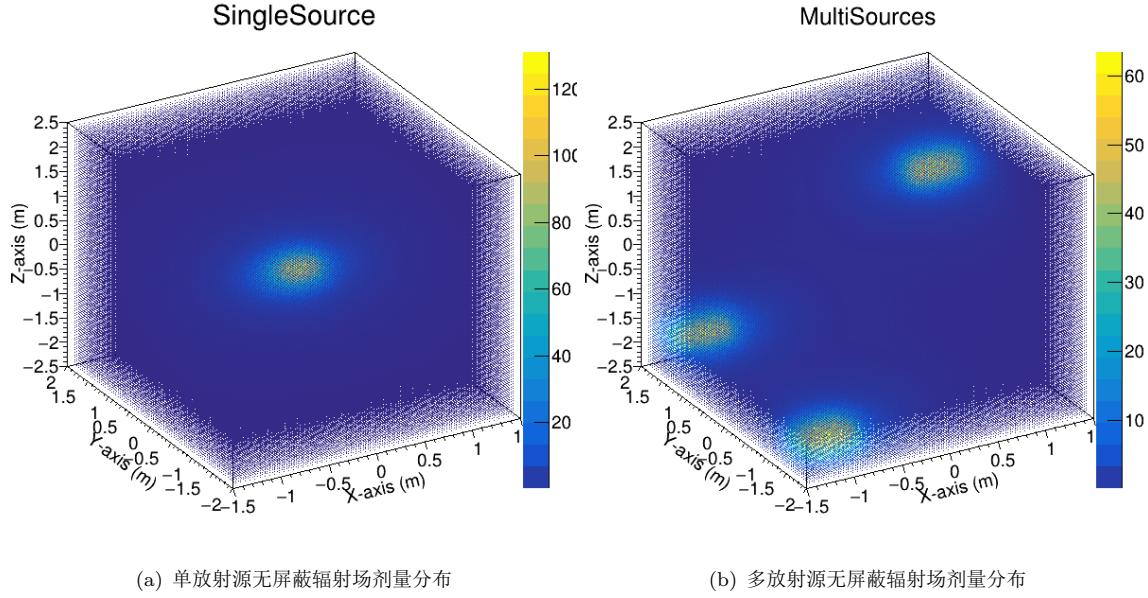


图 2: Geant4 模拟单源辐射场和多源辐射场的剂量分布

从上图可以看出, 在无屏蔽的情况下, 辐射场剂量分布与源项数量相关。由于 Geant4 没有模拟天然本底, 并且  $\gamma$  射线在空气中有一定衰减, 因此在各个源项相距较远的情况下,  $\gamma$  辐射场剂量率分布源项越多, 多源辐射场剂量分布可以看作为多个单源辐射场剂量分布加和。

根据 Geant4 重构出的辐射场, 先每隔 50cm 测量一个数据量, 共测量  $6 \times 8 \times 10$  个数据点, 对辐射场进行插值重构, 再根据辐射场重构方法选取若干测量点数据, 最终得到重构辐射场数据。将重构出的插值数据与 Geant4 模拟仿真的辐射场剂量率相比, 得到不同源项数量与重构片插值的结果如:

表 1: 不同源项数量下重构插值方法对辐射场剂量率的相对偏差

| 插值坐标 (m)              | 单源辐射场相对偏差 (%) | 多源辐射场相对偏差 (%) |
|-----------------------|---------------|---------------|
| (-1.25, -1.75, -2.45) | 38.29         | 61.43         |
| (-1.25, -0.75, -0.65) | 2.43          | 6.78          |
| (-0.85, -1.35, 0.35)  | 0.22          | 3.05          |
| (-0.65, -0.75, 0.15)  | 7.25          | 0.75          |
| (-0.25, -0.75, -0.45) | 1.72          | 3.01          |
| (-0.25, -0.15, 0.55)  | 6.98          | 2.05          |
| (0.35, -1.55, 0.15)   | 2.76          | 1.42          |
| (-1.25, 1.05, 1.95)   | 3.47          | 0.01          |
| (0.75, 0.85, 1.35)    | 0.10          | 31.37         |
| 辐射场平均相对偏差绝对值          | 6.15          | 13.4          |

表 1 列举了部分插值点和辐射场整体插值点相对偏差。从整体偏差值数据可以看出, 单源辐射场重

构整体相对偏差小于多源辐射场重构整体相对偏差。从辐射场插值点相对偏差值可以看出，离测量点越近的重构点，与 Geant4 模拟值的偏差越小；在辐射场空间边缘和源项附近，插值重构相对偏差较大。在空间边缘辐射场偏差较大的原因是 Geant4 模拟辐射场剂量值较低，导致重构相对偏差较大；源项附近插值相对偏差较大的原因为插值算法对梯度较大的领域重构效果不够好。

## 1.2 空间状况对辐射场重构效果的影响

为探究空间状况对辐射场重构效果的影响，本论文分别对无屏蔽空间和带有屏蔽空间情况分别进行 Geant4 模拟。

对于无屏蔽空间辐射场，整体辐射场空间设置为  $3m \times 4m \times 5m$  的立方体三维空间，辐射场材料设定为空气；探测几何体设置为  $50mm \times 50mm \times 50mm$  的  $CsI$  材料，不设置屏蔽物；粒子源设置为能量为  $0.662MeV$  的  $^{137}Cs$  点源，点源位置设置为辐射场空间几何中心。对于有屏蔽空间辐射场，探测几何同样设置为  $50mm \times 50mm \times 50mm$  的  $CsI$  材料，设置两个屏蔽物：一个设置为  $2m \times 1m \times 0.02m$  铅板，位置设为  $(0.4m, 0.8m, 1.7m)$ ；另一个屏蔽物设置为  $2.5m \times 1.8m \times 0.3m$  的钢筋混凝土材料，位置设为  $(0.6m, -0.6m, -1.25m)$ ；粒子源设置为能量为  $0.662MeV$  的  $^{137}Cs$  点源，点源位置设置为辐射场空间几何中心。Geant4 模拟可视化效果如图 3 所示。

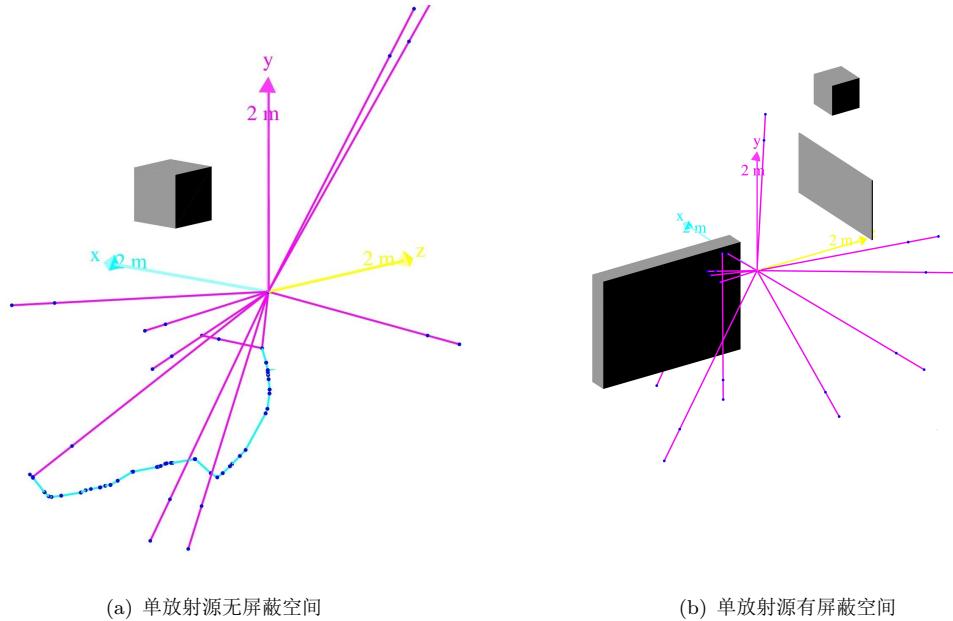


图 3: Geant4 模拟无屏蔽空间辐射场和有屏蔽空间辐射场

通过 Geant4 框架分别对单点源无屏蔽辐射场和单点源带有屏蔽辐射场进行模拟仿真，获得空间辐射场数据使用 ROOT 绘制，如图 4 所示。

从图 4 中可以看出，在单点源情况下，辐射场剂量分布与空间状况相关。在屏蔽物周围的领域内，辐射场剂量变化梯度较大，且梯度大小与屏蔽物材料有关，屏蔽材料的线衰减系数越大，辐射场剂量变化梯度越大。

根据 Geant4 重构出的辐射场，先每隔  $50cm$  测量一个数据量，共测量  $6 \times 8 \times 10$  个数据点，对辐

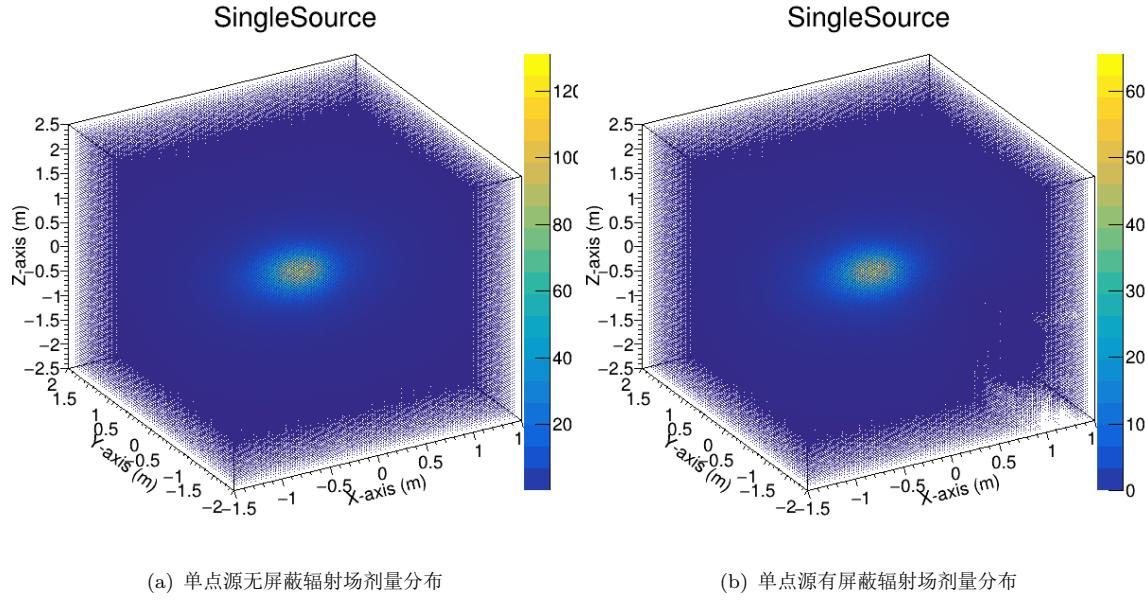


图 4: Geant4 模拟单点源无屏蔽辐射场和单点源有屏蔽辐射场的剂量分布

射场进行插值重构，再根据辐射场重构方法选取若干测量点数据，最终得到重构辐射场数据。将重构出的插值数据与 Geant4 模拟仿真的辐射场剂量率相比，得到不同源项数量与重构片插值的结果如：

表 2: 不同空间状况下重构插值方法对辐射场剂量率的相对偏差

| 插值坐标 (m)              | 无屏蔽辐射场相对偏差 (%) | 有屏蔽辐射场相对偏差 (%) |
|-----------------------|----------------|----------------|
| (-1.25, -1.75, -2.45) | 38.29          | 2.43           |
| (-1.25, -0.75, -0.65) | 2.43           | 3.48           |
| (-0.85, -1.35, 0.35)  | 0.22           | 6.03           |
| (-0.65, -0.75, 0.15)  | 7.25           | 44.89          |
| (-0.25, -0.75, -0.45) | 1.72           | 59.07          |
| (-0.25, -0.15, 0.55)  | 6.98           | 16.57          |
| (0.35, -1.55, 0.15)   | 2.76           | 2.19           |
| (-1.25, 1.05, 1.95)   | 3.47           | 3.21           |
| (0.75, 0.85, 1.35)    | 0.10           | 0.85           |
| 辐射场平均相对偏差绝对值          | 6.15           | 53.46          |

表 2 列举了部分插值点和辐射场整体插值点相对偏差。从整体偏差值数据可以看出，无屏蔽辐射场重构整体相对偏差小于带有屏蔽辐射场重构的整体相对偏差。从带有屏蔽的辐射场插值点相对偏差中可以看出，在靠近屏蔽物的地方，插值重构效果不是很好，说明插值重构在变化梯度大的位置重构的效果不够优秀。将空间状况与辐射场相对偏差数据同源项数量与相对偏差数据相比，可以看出空间状况对辐射场重构效果影响更大，或者说，本论文提出的辐射场重构方法对带有屏蔽的辐射场重构效果相对较差。

### 1.3 测量点数据对辐射场重构效果影响

为探究测量点数据对辐射场重构效果的影响,本论文分别对单点源无屏蔽空间辐射场、多点源无屏蔽空间辐射场、单点源带屏蔽空间辐射场、多点源带屏蔽空间辐射场四种 Geant4 模拟辐射场进行不同测量点数量、测量点位置对比、分析。

对于以上四种不同类型辐射场，初始测点数量均为  $6 \times 8 \times 10$  个，根据本论文提出的辐射场插值重构方法，对于单点源无屏蔽辐射场最终测点数量为 480 个；多点源无屏蔽辐射场最终测点数量为 489 个；单点源有屏蔽辐射场最终测点数量为 491 个；多点源有屏蔽辐射场最终测量点数量为 483 个。四种辐射场相对偏差值大小及分布如图 5 所示。

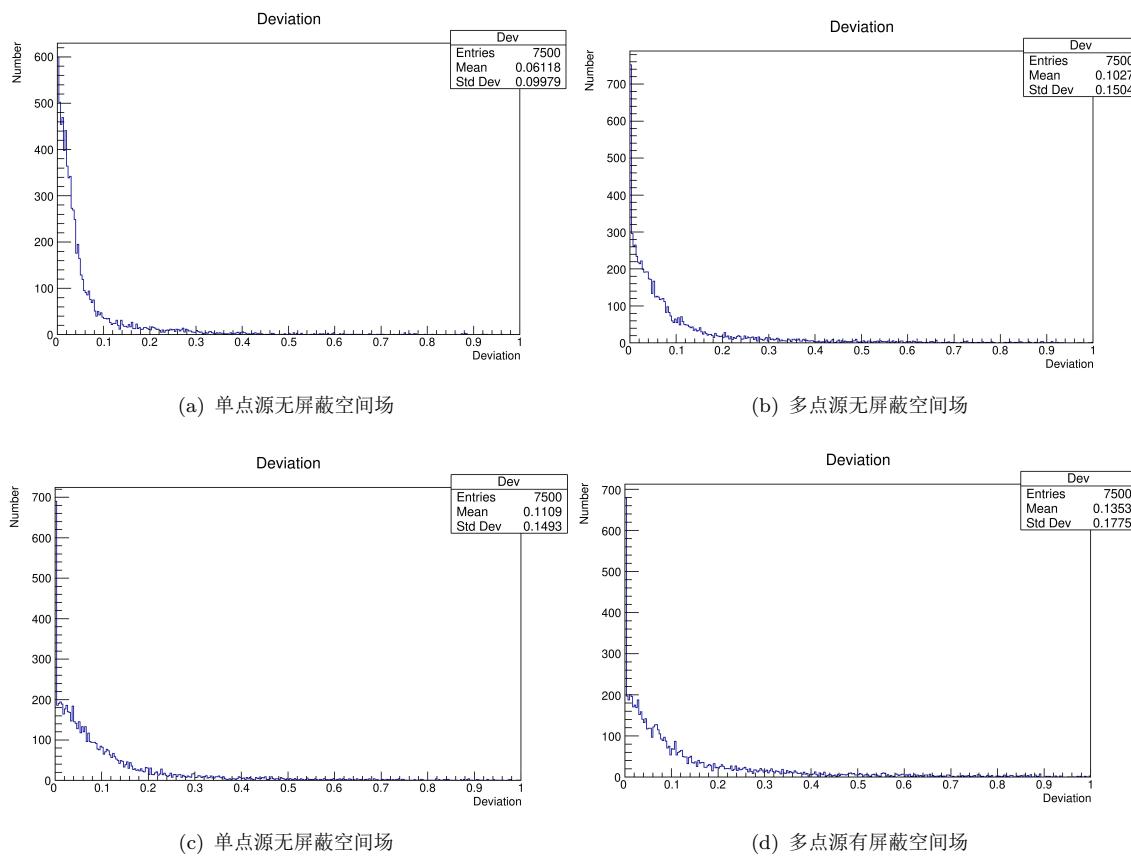


图 5: 空间辐射场插值重构相对偏差分布

从辐射场重构相对偏差分布中可以看出，相对偏差大小从低到高数量分布大致呈半高斯分布。图 5(a)通过高斯拟合后  $\sigma = 0.19$ ；图 5(b)通过高斯拟合后  $\sigma = 0.37$ ；图 5(c)通过高斯拟合后  $\sigma = 0.45$ ；图 5(d)通过高斯拟合后  $\sigma = 0.55$ 。通过对比四种辐射场相对偏差分布半高斯拟合方差  $\sigma$  大小，可以分析出在单点源无屏蔽空间辐射场中，采用本论文提出的辐射场插值重构方法，得出的插值重构数据 68.27% 相对偏差在 5% 以内；在多点源无屏蔽空间辐射场中，得出的插值重构数据 68.27% 相对偏差在 11% 以内；在单点源有屏蔽空间辐射场中，得出的插值重构数据 68.27% 相对偏差在 14% 以内；在多点源有屏蔽空间辐射场中，得出的插值重构数据 68.27% 相对偏差在 18% 以内。

通过改变初始测点数量，分别对以上四种辐射场进行插值重构，得到初始测点数量与相对偏差平均

值的关系 (初始测量点位置为随机选取) 如图 6 所示。

The relationship between the number of initial measuring points and relative deviation

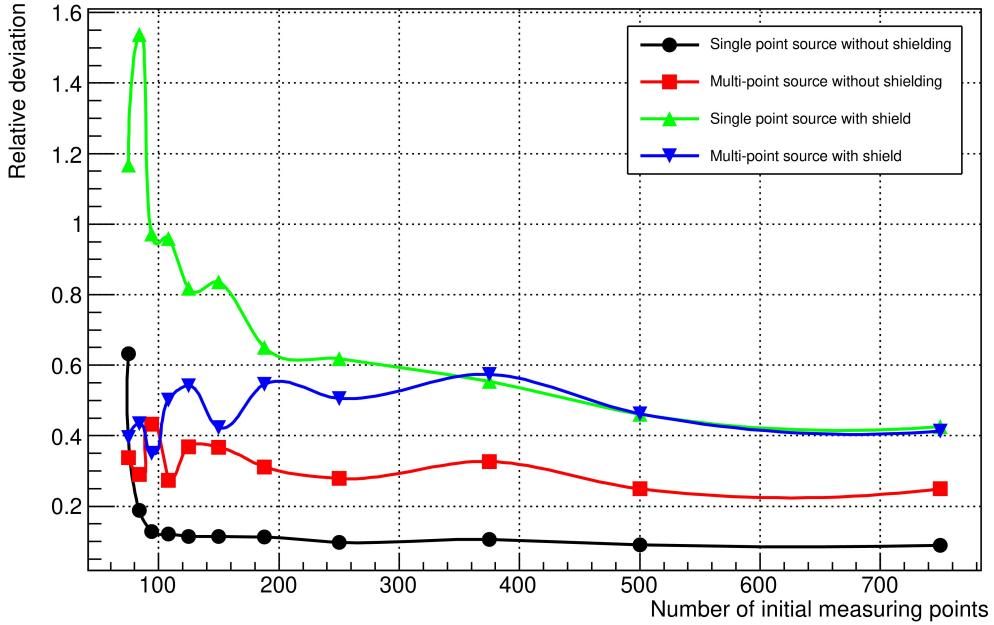


图 6: 初始测点数量与相对偏差的关系

从图 6 中可以看出, 初始测量点数据增加时, 整体相对偏差呈下降趋势。通过对不同初始测点数据进行插值重构, 发现当初始测点数量较少时, 通过本论文提出的插值重构算法, 在插值过程中添加测点数量越多。对比四种辐射场, 可以发现本论文提出的辐射场插值重构方法对无屏蔽空间辐射场重构效果较好, 源项数量增加对重构相对偏差有一定影响, 但相对偏差大小在一定范围内; 而对带有屏蔽辐射场重构效果相对一般, 主要原因是对于带有屏蔽空间辐射场, 其剂量分布在屏蔽物周围变化较大, 插值重构方法对变化梯度较大的数值重构效果一般。

## 2 辐射场重构方法比较

本研究分别采用多层 B 样条插值重构方法、克里金插值重构方法以及本论文提出的插值重构方法对上一节中模拟的四种辐射场进行插值重构。通过对比重构相对偏差以及重构时间来比较三种插值重构方法的在不同辐射场下的重构效果。

### 2.1 辐射场重构相对偏差比较

多层 B 样条插值重构算法原理见第二章, 是插值算法中常用的一种算法; 克里金插值重构算法原理见第三章, 是一种多用于地质勘探领域的插值算法; 本论文提出的辐射场插值重构算法见第四章, 是一种结合多层 B 样条插值算法和克里金插值算法的创新插值重构算法。下面分别对该三种插值重构算法在单点源无屏蔽空间辐射场、多点源无屏蔽空间辐射场、单点源有屏蔽空间辐射场、多点源有屏蔽空间辐射场进行应用, 比较其在不同辐射场中的相对偏差大小。

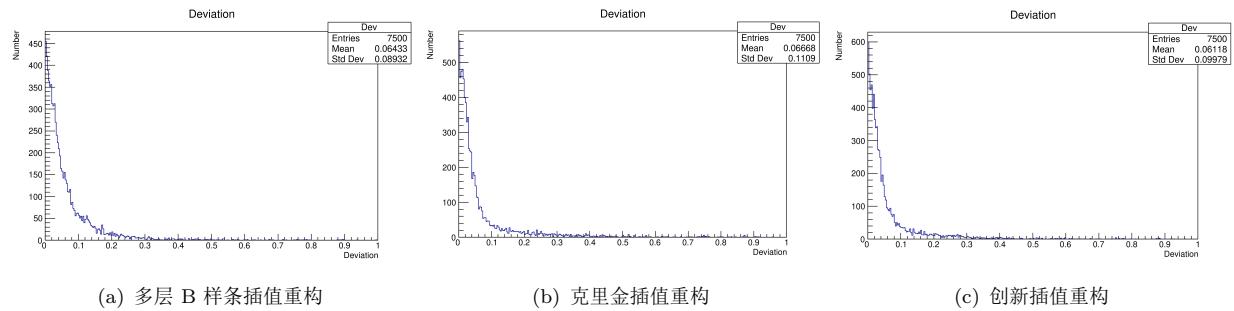


图 7: 单点源无屏蔽空间辐射场插值重构相对偏差对比

从图 7 中可以看出, 三种插值算法都能较好的重构出辐射场剂量分布, 本论文提出的插值重构方法相比于多层 B 样条插值重构方法和克里金插值重构方法要略好。

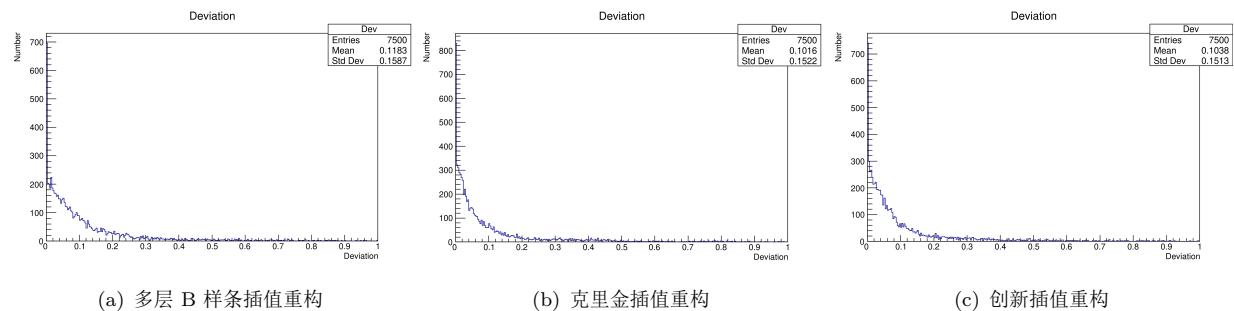


图 8: 多点源无屏蔽空间辐射场插值重构相对偏差对比

从图 8 中可以看出, 三种插值算法都能不错的重构出辐射场剂量分布, 克里金插值重构方法的相对偏差总体要好于多层 B 样条插值重构方法和本论文提出的插值重构方法, 因为在多点源无屏蔽辐射场中, 辐射场剂量分布情况通过克里金插值重构方法相比多层 B 样条插值重构方法更加合适, 因此重构结果偏差相对较小。

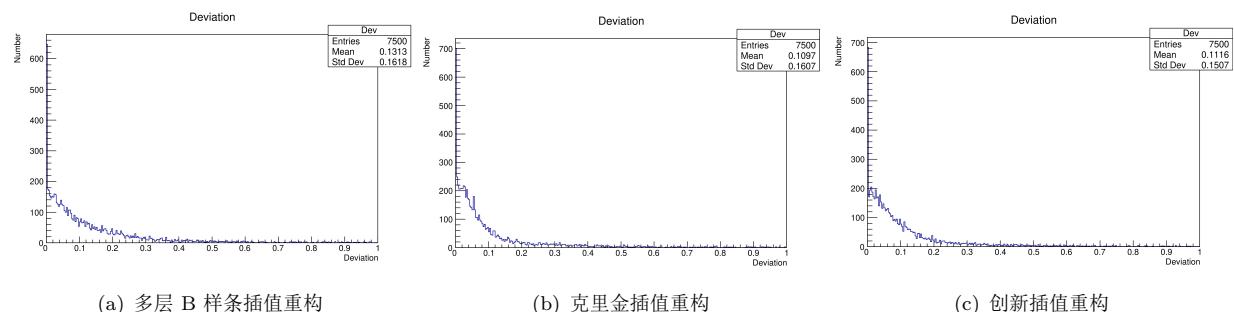


图 9: 单点源有屏蔽空间辐射场插值重构相对偏差对比

从图 9 中可以看出, 多层 B 样条插值重构与模拟结构的相对偏差大于克里金插值重构和本论文提出的辐射场插值重构方法相对偏差, 说明在带有屏蔽的辐射场下, 样条插值重构方法差于克里金插值重构方法。

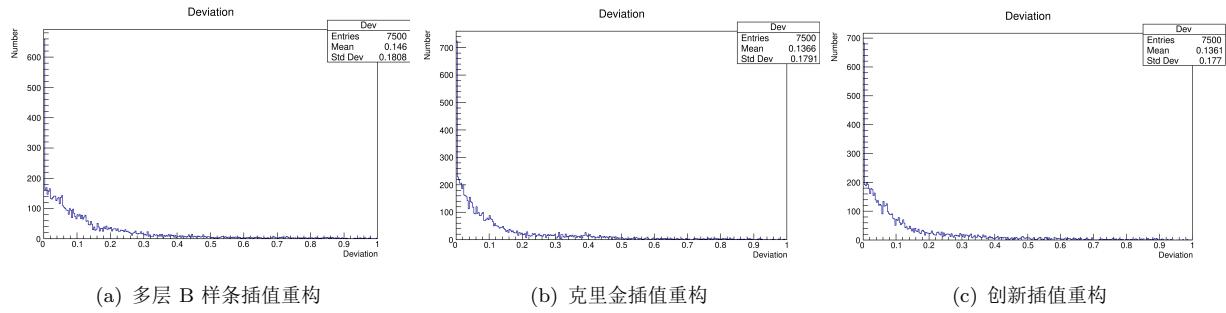


图 10: 多点源有屏蔽空间辐射场插值重构相对偏差对比

从图 10 中可以看出,三种插值算法都能较好的重构出辐射场剂量分布,本论文提出的插值重构算法重构效果与克里金插值重构算法重构效果相似,略好于样条插值重构算法重构的辐射场结果。

通过对本论文提出的插值重构方法与多层 B 样条插值重构方法和克里金插值重构方法的重构相对偏差,发现本论文提出的插值重构方法在某些插值点要明显好于其他两种方法,但在某些插值点也明显。例如在多点源无屏蔽空间辐射场中,存在多层 B 样条插值重构相对偏差较小的插值点,也存在克里金插值重构相对偏差较小的插值点,亦存在本论文提出的辐射场插值重构相对偏差较小的插值点,如表 3 所示。通过比较这些插值方法,发现在辐射场剂量分布较为平缓的区域内,多层 B 样条插值重构出的辐射场与模拟值相对偏差较小;在辐射场剂量分布变化较大的区域,克里金插值重构出的辐射场与模拟值相对偏差较小。

表 3: 不同重构插值方法下辐射场剂量率插值相对偏差比较

| 插值坐标 (m)              | 多层 B 样条插值重构 (%) | 克里金插值重构 (%) | 创新插值重构 (%) |
|-----------------------|-----------------|-------------|------------|
| (-1.45, -0.75, -0.65) | 6.81            | 10.00       | 8.41       |
| (-1.25, 1.05, 1.95)   | 1.02            | 0.86        | 0.01       |
| (0.75, 0.05, -0.25)   | 3.98            | 0.41        | 2.19       |

## 2.2 辐射场重构时间比较

为探究三种辐射场重构方法在重构时间上的关系,将多层 B 样条插值重构方法、克里金插值重构方法和本论文提出的辐射场插值重构方法分别在以上四种辐射场进行插值,记录其重构所需的时间,结果如表 4 所示。

从表 4 中可以看出,三种插值重构方法中克里金插值重构所花费的时间最短,本论文提出的插值重构方法时间其次,多层 B 样条插值重构时间最长。在实际辐射场重构应用中,该三种方法重构所花费的时间均可。

表 4: 不同重构插值方法下辐射场重构时间比较

| 空间辐射场类型  | 多层 B 样条重构时间 (s) | 克里金重构时间 (s) | 本论文重构时间 (s) |
|----------|-----------------|-------------|-------------|
| 单点源无屏蔽空间 | 1.20776         | 0.000233    | 0.001025    |
| 多点源无屏蔽空间 | 2.02339         | 0.000188    | 0.001567    |
| 单点源有屏蔽空间 | 1.9229          | 0.000169    | 0.00236     |
| 多点源有屏蔽空间 | 1.93904         | 0.000223    | 0.001668    |

### 3 本章小结

本章对辐射场插值重构方法进行了详细的验证，并且将本论文提出辐射场插值重构方法与多层 B 样条插值重构方法和克里金插值重构方法进行比较。本章分别探究了源项数量、辐射场空间状况以及测点数量对辐射场插值重构的影响，结果表明源项数量对辐射场插值有一定影响；空间屏蔽物对重构结果的影响比源项数量大；对辐射场插值重构起决定性影响的为初始测点数量。当辐射场测点数量低于一定数量时，插值重构效果都难以达到满意的效果。

通过将本论文提出的插值重构方法与多层 B 样条插值方法和克里金插值重构方法比较，发现在辐射场剂量分布较为平缓的区域，多层 B 样条插值重构方法重构出的辐射场效果较好；在辐射场剂量分布变化梯度较大的区域，克里金插值重构方法重构出的辐射场效果较好。总体来说，本论文提出的插值重构效果在不同区域均能重构出不错的效果。三种插值重构方法在重构时间上均能满足应用要求。