

辐射场重构方法设计与实现

刘铭

2021 年 5 月 25 日

目录

1 辐射场数据获取及存储结构

辐射场数据获取方式包括实验测量和计算机模拟。对于 γ 空间辐射场测量，通常采用便携式 γ 剂量率检测仪，但实验测量获取辐射场数据在考虑测量人员辐照量的情况下，实验空间内距离放射源较远的位置剂量率难以与本底区分，因此本论文用于验证空间辐射场重构方法所获取的辐射场数据，全部采用计算机模拟方法获得。

目前，计算机模拟方法中使用最多的是蒙特卡洛法 (Monte Carlo method) [?]，该方法也称为统计模拟方法，其方法是以概率统计理论为基础，获得模拟参数近似解的数值计算方法。该方法最早在核科学领域的应用是第二次世界大战时期，美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 (Los Alamos National Laboratory, 简称 LANL) 使用蒙特卡洛方法解决核武器研发和制造过程中核燃料中子随机扩散概率问题。经过多年的发展，目前 LANL 已经开发出了第六代蒙特卡洛粒子输运代码 (Monte Carlo N-Particle, 简称 MCNP)，该仿真工具为辐射防护和剂量测定、辐射屏蔽、射线照相、医学物理学、核临界安全性、探测器设计和分析、核油测井、加速器目标设计、裂变和聚变反应堆的设计、净化及退役等应用领域提供了必不可少的数值模拟。同样，欧洲核子研究组织 (CERN) 也在 20 世纪 90 年代开发蒙特卡洛应用软件框架 Geant4，其用于模拟粒子在物质中输运的物理过程，由于其开源的特点，Geant4 发展至今已开发出 10.7 版本。Geant4 在涉及微观粒子与物质相互作用的诸多领域获得了广泛应用，例如空间应用、微电子学、辐射医学、屏蔽计算。

本论文辐射场数据通过 Geant4 数值模拟获取，基于 C++ 语言，利用面向对象程序设计对 Geant4 蒙特卡洛模拟框架分别在几何、跟踪、探测器响应、运行管理等方面进行重新构造，模拟出本论文所需的空

间辐射场各个位置剂量数据。

对于辐射场模拟数据，采用 csv 格式进行存储并存储为三个文件：

1. data.csv：用于存储测量点数据 (x, y, z, value)
2. points.csv：用于存储重构点位置数据 (x, y, z)
3. values.csv：用于存储重构点辐射场剂量数据 (value)

2 辐射场重构算法设计

空间辐射场三维重构程序采用模块化设计，其主要由四部分组成，分别为数据模块、插值重构模块、偏差运算模块以及可视化模块，如图??所示。

(a) 数据模块

数据模块对辐射场整体数据进行处理以及对重构后偏差较大的点进行判断，该模块具体功能包括：

- 处理 Geant4 输出数据，将数据按照 csv 格式进行存储；
- 添加测量点数据，对于插值偏差较大的区域添加测量点，将其存储于测量点数据文件；
- 整合重构点数据，将重构后的数据进行整理，存储为 ROOT 绘制所需文件类型；

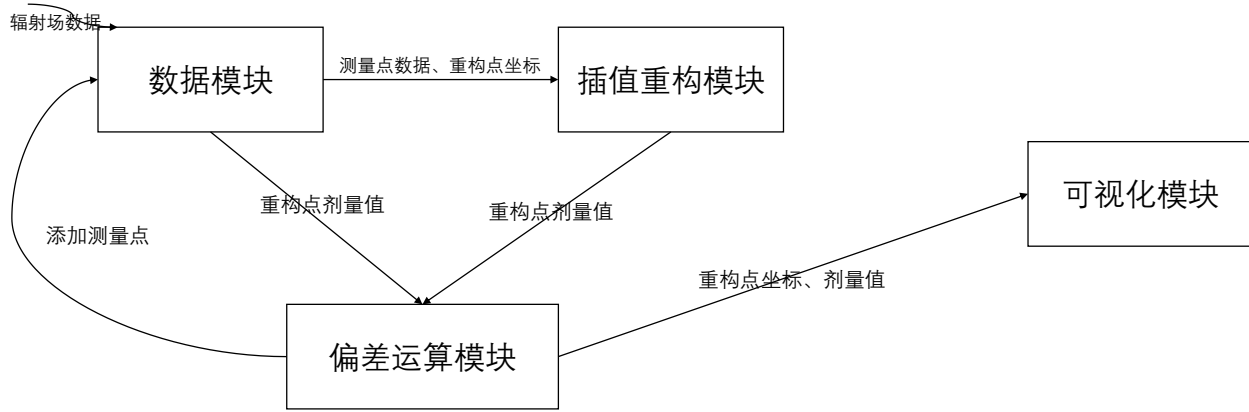


图 1: 空间辐射场三维重构方法程序模块化设计

(b) 插值重构模块

插值重构模块是空间辐射场三维重构程序中的核心模块，其中包含了两种插值算法——样条插值算法和克里金插值算法，其功能是通过两种重构算法对辐射场数据进行插值重构，得到插值重构场，并按权重对两种辐射场数据进行组合，最终得到合适的辐射场；

(c) 偏差运算模块

偏差运算模块为辐射场三维重构程序的重要模块，该模块为本论文提出的插值重构方法中最关键的创新点实现的模块。该模块实现的功能为计算重构辐射场与 Geant4 模拟辐射场中各个坐标点的偏差，对于样条插值重构辐射场与克里金插值重构辐射场偏差较大的区域，选择一个点作为测量点；

(d) 可视化模块

可视化模块是基于计算机的图像处理技术，将辐射场插值重构数据以更直观的形式展现出来，从而使得重构辐射场能够在 ALARA 设计分析、辐射剂量估算等领域得到更好的应用。

数据模块先从 Geant4 模拟中得到辐射场数据，通过数据处理，转换为与插值重构算法模块能够耦合的数据类型，然后存储为 csv 格式；插值重构模块将处理后的数据进行读取、插值重构，分别将样条插值法和克里金插值法重构的辐射场数据进行输出；偏差运算模块得到两个辐射场重构数据后，将其进行偏差计算，若偏差值大于设定偏差量，则将插值区域输出至数据模块，让其进行再次测量，直至两种算法重构的辐射场偏差值在设定范围内，将其辐射场数值进行输出；可视化模块根据重构辐射场数据，将辐射场进行图像绘制。

在辐射场重构方法程序各模块设计基础上，考虑其实现的方法论及相应算法，总程序采用高内聚、低耦合的设计思想，尽可能将内容内聚、数据耦合，形成模块内功能内部连续，外部通过数据接口进行连接。本论文采用的辐射场重构算法的程序框图如图??所示。

下面介绍该程序每一步骤所实现的方式：

(a) 导入数据：

辐射场可视化数据包括测量点数据文件、插值点坐标数据文件以及插值点辐射场剂量数据文件，导入数据步骤将三个文件分别按照各文件存储格式进行导入指定目录下；

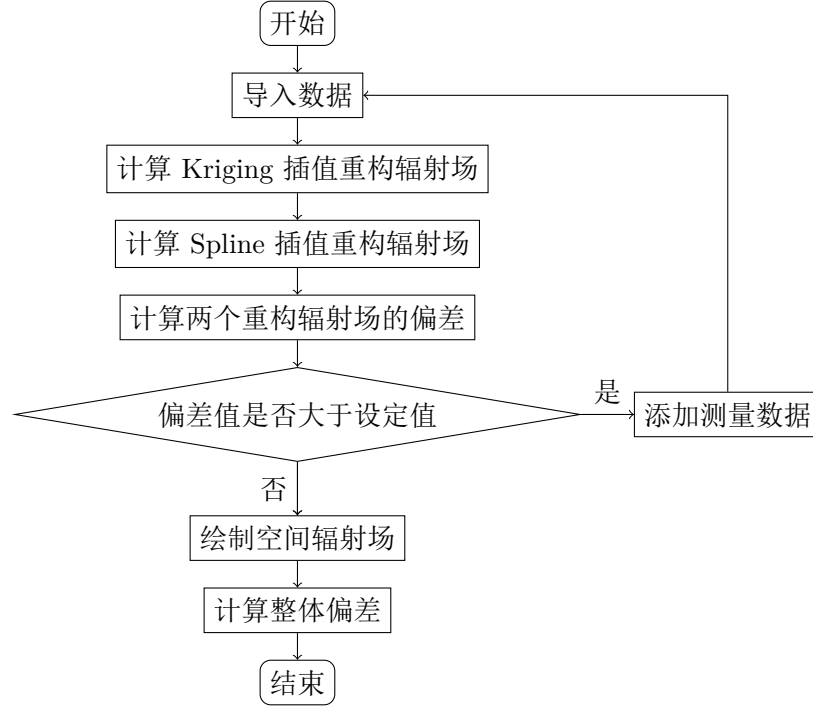


图 2: 辐射场重构算法程序框图

(b) 计算 Kriging 插值重构辐射场:

Kriging 插值算法采用普通克里金模型, 变异函数采用指数函数, 具体计算方法原理及算法见第三章。本论文 Kriging 插值算法基于日本 GIS 公司开发的开源框架 Polatory 开发, Polatory 框架是基于径向基函数 (RBF) 插值的快速、高效框架;

(c) 计算 Spline 插值重构辐射场:

Spline 插值算法具体原理以及算法见第二章, 本论文采用的样条插值算法为多层 B 样条插值算法 (MBA), 本论文的辐射场样条插值算法是基于俄罗斯科学院研究员 Denis Demidov 在 Github 开源平台开源的 mba 库, mba 库是基于 Seungyong Lee 发表的《使用多层 B 样条进行散乱数据插值》论文中多层 B 样条插值算法^[7]编写;

(d) 计算两个重构辐射场的偏差:

通过 Kriging 插值和 Spine 插值后, 得到两个不同的辐射场数据, 通过计算两个辐射场的相对偏差 (relative deviation), 来决定是否需要添加测量点来优化辐射场重构效果。相对偏差计算公式如下:

$$RD = \frac{|v_k - v_s|}{\frac{1}{2}(v_k + v_s)} \times 100\% \quad (1)$$

其中 RD 表示辐射场相对偏差; v_k 代表克里金插值算法重构出的插值; v_s 代表多层 B 样条插值算法重构出的插值;

(e) 判断偏差值是否大于设定值:

通过上一步骤计算得到整个辐射场两种重构方法重构的偏差值之后, 对其偏差较大的区域 (大于设定偏差值), 选取该区域内最大的偏差点进行再次测量;

(f) 添加测量数据：

将上一步骤中得到的偏差最大的点的数据添加到测量点数据文件中，保存为相应格式；

(g) 绘制空间辐射场：

获得到重构辐射场数据后，将数据保存为 root 格式，使用 ROOT 进行绘制，具体步骤在下一节中进行详细介绍；

(h) 计算整体偏差：

在获得重构辐射场数据后，将辐射场插值数据与模拟数据进行计算，比较辐射场重构方法的重构效果。

3 空间辐射场可视化

辐射场可视化是对空间辐射场重构方法直观性的验证。相比于辐射场重构点数据，以图形、图像形式展现空间辐射场更直观。对于辐射场重构后的应用场景，例如核设施退役检修，辐射场可视化更容易对维修人员进行 ALARA 设计；矿井内重构辐射分布，以可视化的形式展示更加有利于矿工做出应对措施；公众进行核科普宣传时，以图形、图像甚至 VR、AR 形式对公众进行展示辐射场，更能提高公众对辐射防护、核安全的学习兴趣。

三维空间辐射场数据为 4D 数据 $(x,y,z,value)$ ，4D 数据可视化可通过现有的虚拟现实编辑软件实现^[7]，或者利用一些工具框架进行实现，例如：基于 matlab 程序设计语言的 scatter3 等函数；基于 python 程序设计语言中 matplotlib 库中的相关函数；基于 C++ 程序设计语言的 OpenGL 框架、ROOT 框架等等。本论文采用的可视化工具为 ROOT 数据处理框架，ROOT 是 CERN 开发的数据处理框架，可以用于数据存储、访问、处理以及绘制，并且提供交互式运行界面以及可创建图形化用户界面，还提供与其他程序设计语言的接口 (Python、R)。

4 本章小结

本章详细介绍了空间辐射场三维重构方法的设计与实现过程，主要分成三个部分进行介绍：辐射场数据获取、重构算法设计以及辐射场数据可视化。首先对辐射场数据来源进行了详细介绍，然后介绍辐射场重构算法程序的模块化开发以及每个模块所实现的功能作用，再通过流程图详细说明了辐射场重构算法的实现步骤，最后基于 ROOT 框架介绍辐射场数据可视化的实现方式。