

# 专利申请技术交底书

## 一、发明名称

一种面向核设施的多源三维定位及辐射场重建技术系统

## 二、背景技术

核设施安全运营面临着日益严峻的挑战，其场所环境复杂、设备布局密集，传统辐射监测方法往往存在测量位置受限、人员可及性差、测量效率低下等问题。同时，核设施内可能存在的未知辐射热点，其活度、能谱和空间分布等信息具有较大不确定性，给源项调查工作带来巨大困难。

现有技术主要包括以下几种解决方案：

1. 最小二乘法：台湾大学 Chen 等(2014 年)研制了用于三维空间建图与源项定位的智能车，使用 RGBD 相机结合 ICP 算法进行三维建图，利用最小二乘法估计多个点源。该方法在源项定位算法中会对残差较大的探测值进行剔除，能够提升定位精度，但对探测器数量要求较高。

2. 极大似然估计/期望最大化：Deb 提出使用极大似然估计和期望最大化方法解决多源定位问题。该方法可以找到源活度在空间中的近似分布，并采用 Fisher 评分迭代方法求解极大似然估计。Hellfeld 等开发的 NG-LAMP 装置使用期望最大化及后验概率最大化算法，并加入点源假设，但该方法在离散域求解时计算复杂度随网格数量增加而急剧增大。

3. 贝叶斯估计：Morelande 和 Ristic 等(2007 年)首次使用贝叶斯估计和极大似然估计解决源项定位及活度估计问题。贝叶斯估计在信噪比较低的情况下表现优于极大似然估计但计算复杂度高。

4. 神经网络：一些研究者开始尝试使用深度学习方法解决放射源定位问题，但往往需要大量数据进行训练，且对特定场景的适应性有限。

现有技术存在的主要问题包括：(1)大多数方法集中于二维平面或离散网格空间中的多源定位，而核设施中的放射源是在三维空间中连续分布的；(2)大多数研究主要考虑了空气对辐射的衰减，而忽略了复杂管道系统中管道壁对辐射的屏蔽效应；(3)现有研究主要集中在定位少量放射源的场景，而核设施中可能涉及更多放射源；(4)现有方法未能有效利用管道系统的几何约束作为先验信息，导致计算资源的浪费和定位精度的降低。

## 三、发明创造的目的

针对现有技术中存在的问题，本发明的目的是提供一种面向核设施的多源三维定位及辐射场重建技术系统，具体解决以下问题：

1. 解决现有技术在复杂管道系统中无法准确定位多个放射性点源的问题；
2. 解决现有技术未能有效利用几何约束作为先验信息的问题；
3. 解决现有技术在屏蔽材料存在的情况下定位精度下降的问题；
4. 解决现有技术辐射场重建精度不足的问题。

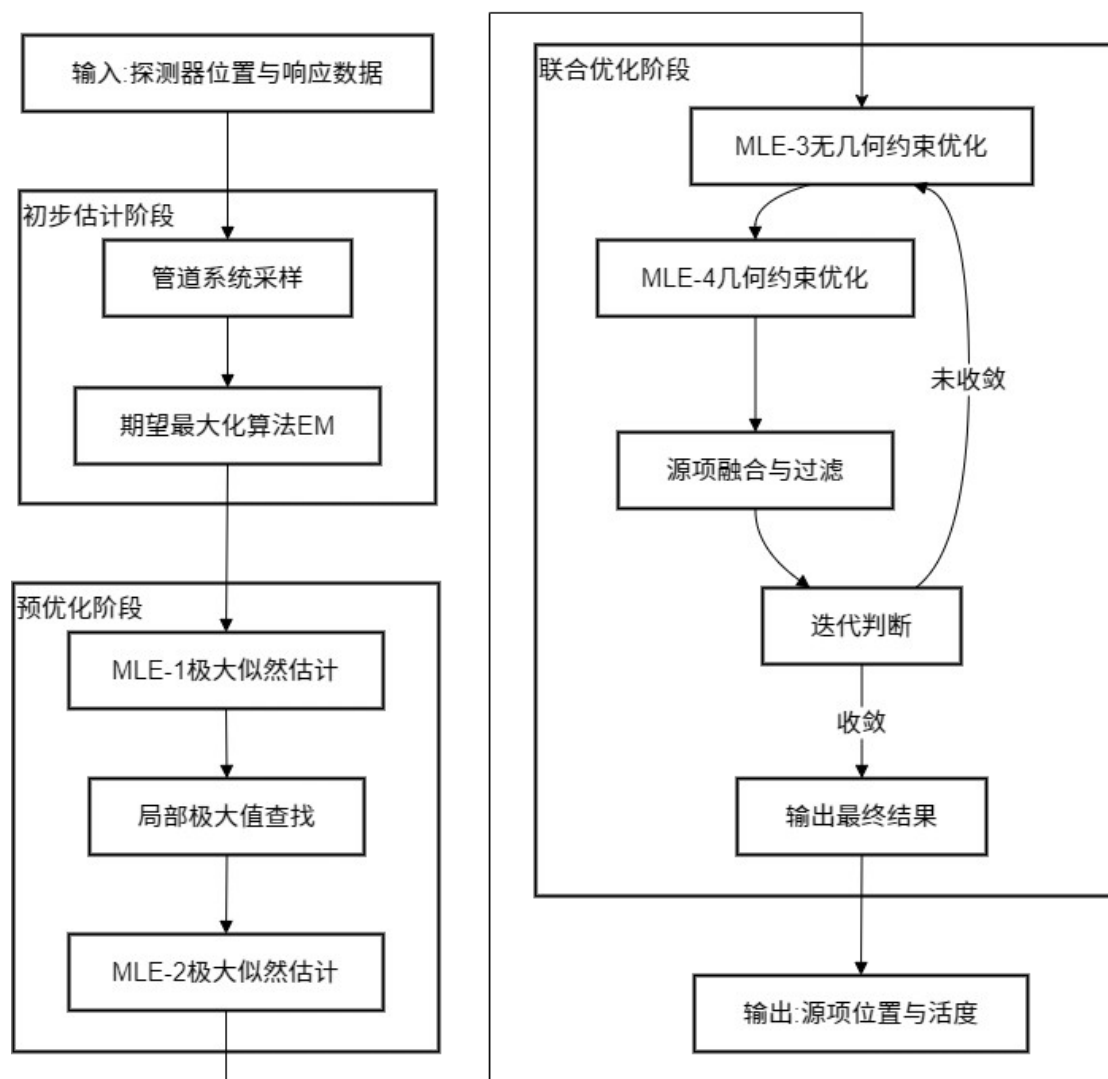
## 四、技术方案

本发明提供了一种面向核设施的多源三维定位及辐射场重建技术系统，包括两个核心部分：融合几何约束的 Geo-EM-ML 多源三维定位算法和基于 Geo-EM-ML 的辐射场重建技术。

### 4.1. Geo-EM-ML 多源三维定位算法：

该算法采用"离散域粗定位-连续域精优化"的两阶段混合求解框架，通过"初步估计-预优化-联合优化"三阶段渐进式结构，将管道系统的几何信息作为先验约束引入优化过程。

Geo-EM-ML 算法架构如下：



### 1. 初步估计：

将管道系统离散化为大小一致的管道单元，并在每个单元中心设置一个假设放射源；

使用期望最大化算法(EM)对这些离散位置的放射源活度进行估计；

通过计算泊松分布的概率和迭代优化，得到初步的源项分布估计。

### 2. 预优化：

将初步估计结果作为输入，使用极大似然估计法(MLE-1)对源项活度进行优化；

对 MLE-1 结果进行局部极大值查找，排除活度较小的放射源；

对局部极大值处的活度进行二次极大似然估计(MLE-2)，得到更精确的活度估计。

### 3. 联合优化：

在每次迭代中，首先使用不带几何约束的极大似然估计(MLE-3)优化源项位置和活度；

然后使用带几何约束的极大似然估计(MLE-4)进一步优化位置和活度；

每次迭代后进行源项融合和过滤，减少估计的放射源数量；

当连续两次迭代间放射源数量不变时，算法收敛，输出最终结果。

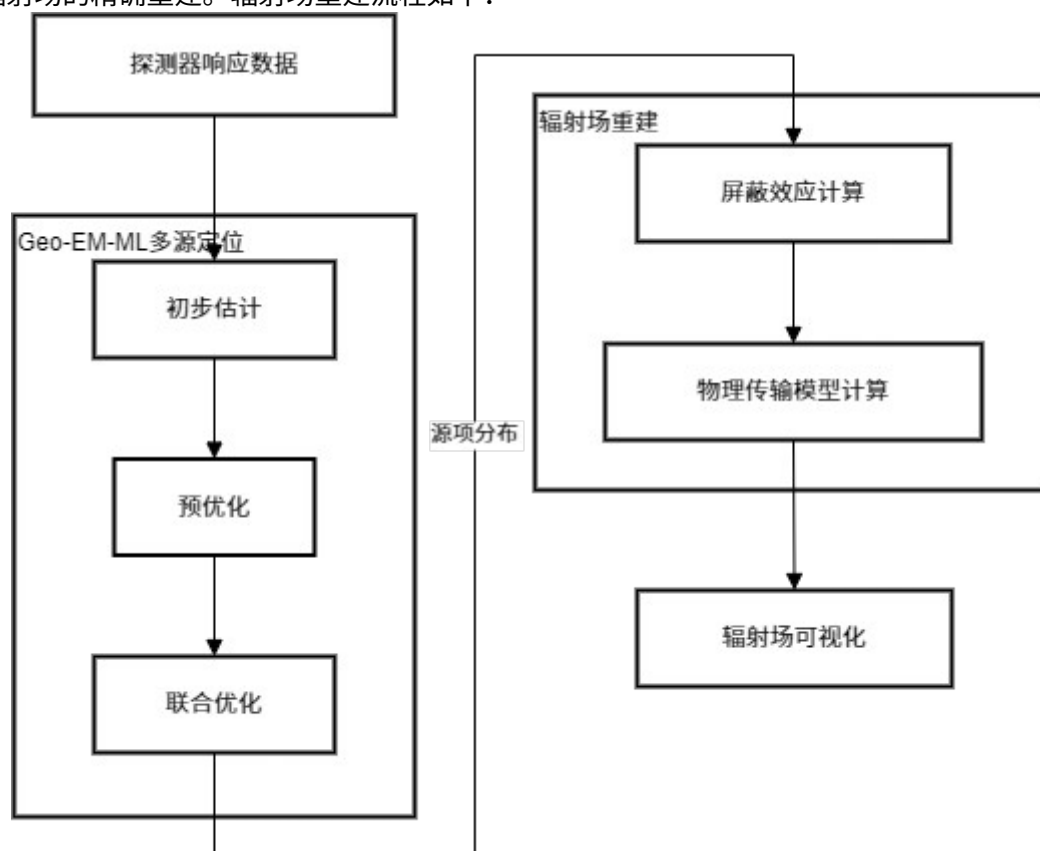
该算法的关键技术模块包括：

#### 1. 几何约束建模：

- 在初步估计阶段，使用 PIPE 采样策略，将放射源位置限制在管道系统内部；
- 在联合优化阶段，将放射源到管道中轴线的距离函数通过高斯分布概率化，引入极大似然估计的目标函数；
- 通过调整高斯分布的方差参数，平衡几何约束的强度与优化过程的平滑性。
2. 源项融合与过滤策略：
- 在预优化阶段，通过局部极大值查找排除活度值较小的放射源；
- 在联合优化阶段，将距离小于预设阈值的多个放射源合并为一个，防止过度估计源数量；
- 使用活度阈值过滤器排除低活度放射源，减少计算复杂度。
3. 基于光线追踪的屏蔽效应计算：
- 将管道系统建模为三角网格模型；
- 使用光线追踪技术计算放射源到探测器之间的光线传输路径；
- 根据材料属性和穿透路径，精确计算屏蔽衰减效应。
4. 计算加速优化：
- 使用空间索引结构加速光线与三角网格的交点计算；
- 对相似路径的屏蔽计算结果进行缓存，避免重复计算；
- 使用并行计算技术加速屏蔽效应计算过程。

#### 4.2.基于 Geo-EM-ML 的辐射场重建技术：

该技术基于前述多源三维定位算法的结果，结合辐射传输物理模型，实现任意空间点辐射场的精确重建。辐射场重建流程如下：



1. 基于泊松分布的物理传输模型：
- 利用已知的点源位置和活度，通过反比平方定律和指数衰减定律计算任意点的辐射强度；

考虑管道屏蔽效应，使用光线追踪技术计算屏蔽衰减因子。

## 2. 辐射场可视化：

以三维体素网格形式表达辐射场分布；

使用伪彩色映射和等值面技术直观显示辐射强度分布；

支持不同剖面视图切换，便于分析辐射场特征。

该技术实现了从快速响应到高精度分析的多级辐射场重建解决方案，构建了"定位-重建"一体化的辐射场重建技术体系。

## 五、有益效果

本发明相比于现有技术具有以下有益效果：

1. 定位精度显著提高：在管道壁厚为 5mm、随机布置 6 个放射源、放射源活度参数最小与最大比值为 1:2、使用 135 个以上探测器的典型条件下，Geo-EM-ML 算法可实现 92% 以上的定位成功率，平均位置误差小于 8.58 毫米，平均活度误差小于 4.96%。

2. 辐射场重建精度优越：基于 Geo-EM-ML 的辐射场重建对复杂管道的辐射场重建平均误差低于 7%，显著低于传统的辐射场重建方法。

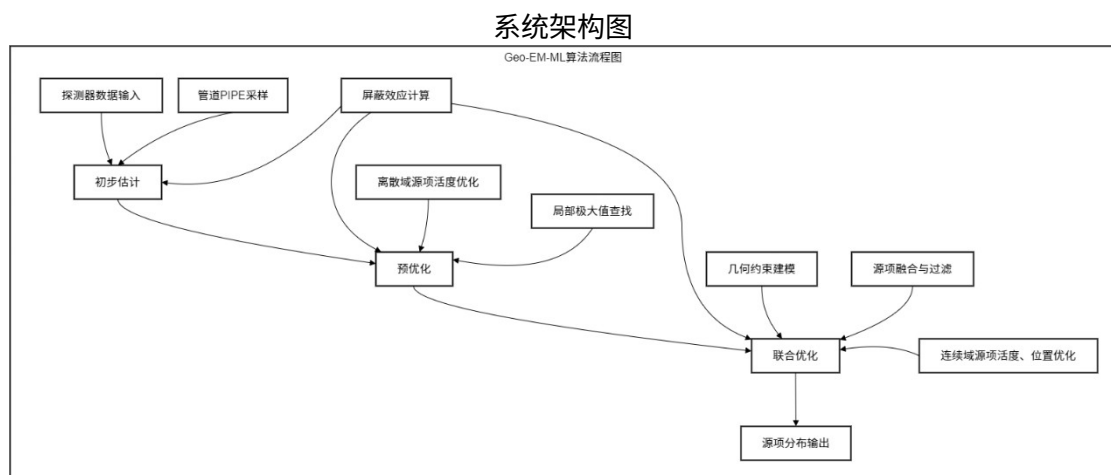
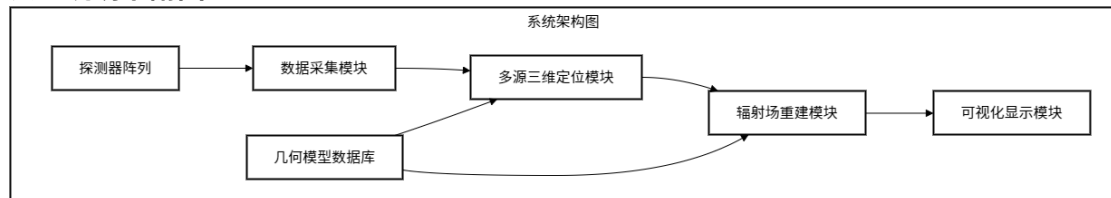
3. 降低设备和人力成本：通过非接触式测量，无需进入高辐射区域，降低了人员剂量，提高了核设施的辐射防护水平；同时，通过优化探测器布局，可减少所需的探测器数量。

4. 计算效率提升：通过引入几何约束，算法中带几何约束的 MLE-4 计算时间是不带几何约束的 MLE-3 的四分之一到三分之一，显著提高了收敛效率。

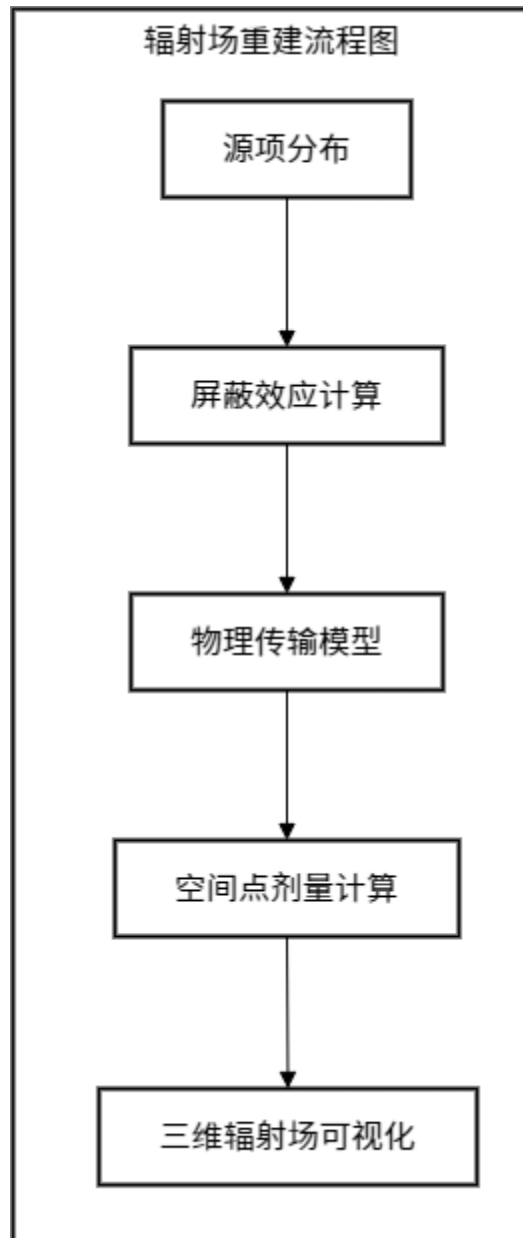
5. 实用性和适应性增强：能够自动确定放射源的数量，适应不同管道材料和厚度，适用于核电站、后处理厂等各类核设施的辐射监测和防护优化。

6. 应急响应能力提升：初步估计模块可在约 2 秒内快速给出可能存在放射源的区域，为应急响应提供重要支持。

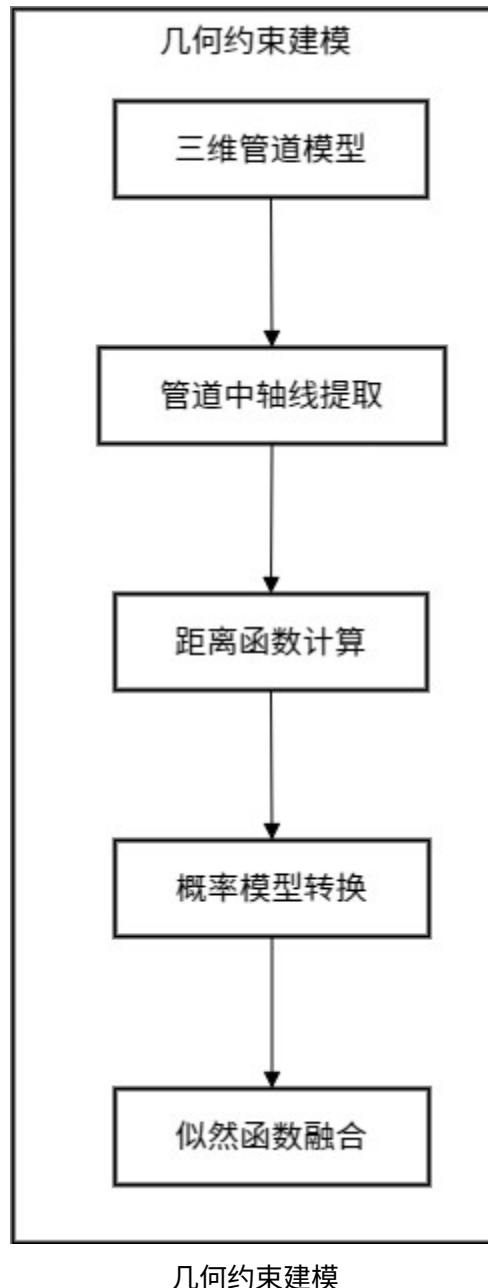
## 六、说明书附图



Geo-EM-ML 算法流程图



辐射场重建流程图



## 七、具体实施方式

### 7.1. 实施例一：核电站一回路系统的多源三维定位

在一个核电站一回路系统中，需要定位可能存在的放射源热点。该一回路系统由不锈钢管道构成，管道壁厚为 5mm。

首先，使用激光扫描仪获取管道系统的三维几何模型，并转换为三角网格模型。

然后，在管道系统周围均匀布置 164 个 NaI(Tl)闪烁体探测器，以 GRID 布局方式排列，探测器灵敏面均朝向管道系统。每个探测器记录在 60 秒内接收到的 662keV 能量的  $\gamma$  光子全能峰计数。

接下来，运行 Geo-EM-ML 算法进行多源定位：

1. 初步估计阶段：将管道系统均匀离散化为 1000 个管道单元，对每个单元执行期望最大化算法，计算其活度估计值。该过程耗时约 2 秒，输出初步的活度分布图，显示可能存在高活度区域的位置。

2. 预优化阶段：将初步估计结果作为输入，使用极大似然估计法(MLE-1)对活度分布进

行优化；然后进行局部极大值查找，识别出可能的放射源位置；再对这些位置进行二次极大似然估计(MLE-2)，进一步优化活度值。

3. 联合优化阶段：交替使用不带几何约束的极大似然估计(MLE-3)和带几何约束的极大似然估计(MLE-4)对辐射源位置、活度进行优化；每轮交替后对优化结果进行源项融合与过滤，将距离小于 10mm 的放射源合并。

最终，算法成功定位放射源。

基于定位结果，进行辐射场重建：

1. 在管道系统周围的空中均匀划分网格点，共计 100,000 个待估计点；
2. 对每个网格点，基于已定位的放射源，计算其辐射场强度；
3. 考虑管道屏蔽效应，使用光线追踪技术计算从每个放射源到网格点的衰减因子；
4. 生成三维辐射场分布图，使用伪彩色映射显示不同区域的辐射强度。

## 7.2. 实施例二：核燃料后处理厂管道系统的多源三维定位

在一个核燃料后处理厂的管道系统中，需要定位可能存在的放射源热点。该管道系统由铅玻璃构成，管道壁厚为 10mm。

首先，使用 CAD 模型获取管道系统的三维几何信息，并转换为三角网格模型。

然后，在管道系统周围随机布置 200 个 CsI(Tl)闪烁体探测器，以 RANDOM 布局方式排列。每个探测器记录在 120 秒内接收到的 662keV 能量的  $\gamma$  光子全能峰计数。

接下来，运行 Geo-EM-ML 算法进行多源定位，过程与实施例一类似，基于定位结果进行辐射场重建。

## 7.3. 实施例三：核电站退役过程中的辐射场重建

在一个核电站退役过程中，需要对主蒸汽管道系统进行辐射场重建，以优化拆除路径和工作计划。该管道系统由碳钢构成，管道壁厚为 8mm。

首先，使用激光扫描仪获取管道系统的三维几何模型，并转换为三角网格模型。

然后，在管道系统周围布置 150 个便携式  $\gamma$  探测器，以混合布局方式排列。每个探测器记录在 90 秒内接收到的多能量  $\gamma$  光子计数。

接下来，运行 Geo-EM-ML 算法进行多源定位，算法最终成功定位了放射源。

基于定位结果进行辐射场重建，并生成辐射场三维可视化图。工作人员根据重建的辐射场，规划了最优拆除路径，降低了工作人员的集体剂量。

通过以上三个实施例可以看出，本发明的 Geo-EM-ML 多源三维定位及辐射场重建技术系统在不同核设施环境下均表现出良好的适应性和准确性，能够有效支持核设施的辐射防护优化、安全监测和应急响应工作。