

学 号 2015020118
密 级 _____

哈尔滨工程大学学士学位论文/毕业设计

汽水混合物伽马成像模拟

院（系）名 称：核科学与技术学院

专 业 名 称：核工程与核技术

学 生 姓 名：王世磊

指 导 教 师：宋玉收 副教授

哈尔滨工程大学

2019年6月

学 号 2015020118
密 级 _____

汽水混合物伽马成像模拟

Gamma Imaging Simulation of Steam-Water Mixture

学 生 姓 名：王世磊
所 在 学 院：核科学与技术学院
所 在 专 业：核工程与核技术
指 导 教 师：宋玉收
职 称：副教授
所 在 单 位：哈尔滨工程大学
论文提交日期：2019年6月12日
论文答辩日期：2019年6月24日
学位授予单位：哈尔滨工程大学

摘 要

在核电站反应堆的冷却剂管道中，通常存在水、气两相并存的情形。在特定的温度、气压以及反应堆运行工况下，气相湿度或者液相中气泡含量等参数的变化对于冷却剂的物理描述和反应堆运行状态的评估至关重要。

本文设计了一种非侵入性的伽马成像系统对汽水混合物进行成像，详细描述了系统的结构组成、尺寸参数以及工作模式。系统选择活度为 100mCi 的 ^{137}Cs 点源作为放射性射线产生部件，11 个 NaI 闪烁体探测器作为探测部件，并且配备相应的准直器。通过 Geant4 工具包模拟了该设备对铝管内的分层流的成像过程并采集到相应数据，并利用 MATLAB 软件通过代数迭代算法将投影数据反推出被测物场物质分布情况，最终重建出管道内物质分布的截面图。

为了进一步验证本套系统的可靠性与可信度，本文选用了一系列图像质量评价参数对重建得到的图像进行了分析与评价，并且对重建图像与原始物场图像之间存在的差异进行了合理解释，最终验证了系统的成像功能。

关键词：伽马成像；汽水混合物；蒙特卡罗模拟；代数迭代算法

ABSTRACT

In the coolant pipelines of nuclear power plants, water and gas often coexist. Changes in parameters such as gas phase humidity or bubble content in liquid phase are very important for physical description of coolant and evaluation of reactor operation state under specific temperature, pressure and reactor operation conditions.

In this paper, a non-invasive gamma imaging system is designed to image the steam-water mixture. The system selects ^{137}Cs point source with activity of 100mCi as radioactive ray generation components, 11 NaI scintillator detectors as detection components and equipped with corresponding collimators. Through the Geant4 tool kit, the imaging process of the layered flow in the aluminum tube is simulated by the equipment, and the corresponding data are collected. Moreover, by using MATLAB, the projection data are deduced from the measured material distribution by algebraic iteration algorithm. Finally, the cross-section of the material distribution in the pipeline is reconstructed.

In order to further verify the reliability and credibility of the system, a series of image quality evaluation parameters are selected to analyze and evaluate the reconstructed images. The differences between the reconstructed images and the original field images are reasonably explained, finally verifying the imaging function of the system.

Key words: Gamma Imaging; Steam-Water Mixture; Monte Carlo Simulation; Algebraic Reconstruction Technique

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 汽水混合物 CT 成像研究现状	2
1.2.2 图像重建算法研究现状	4
1.3 存在的问题及本文主要研究内容	5
第2章 伽马成像技术理论基础	6
2.1 线衰减系数	6
2.2 CT 图像重建原理	6
2.2.1 射线投影基础	7
2.2.2 Radon 变换及逆变换	8
2.3 图像重建算法	9
2.3.1 扇形束图像重建算法	9
2.3.2 代数迭代算法	10
2.4 本章小结	12
第3章 Geant4 软件介绍与系统设计	13
3.1 Geant4 仿真工具包	13
3.1.1 Geant4 简要介绍	13
3.1.2 Geant4 程序结构	13
3.2 汽水混合物伽马成像系统的建立	14
3.2.1 系统模型	14
3.2.2 建模过程	17
3.3 仿真数据获取与处理	18
3.3.1 划分被测物场	18
3.3.2 确定扫描方式	19
3.3.3 设置射线矩阵	19
3.3.4 建立方程组	21
3.3.5 代入迭代算法	21

3.4 本章小结	22
第 4 章 模拟结果分析与评价	23
4.1 模拟结果及评价	23
4.1.1 汽水混合物截面物质分布	23
4.1.2 截面含气率	24
4.2 重建图像质量评价	24
4.2.1 定性评价	24
4.2.2 定量评价	25
4.3 本章小结	27
结 论	28
参考文献	29
致 谢	31

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

汽水混合物是指分别占有不同份额的空气和水的混合物，也称为由空气和水所组成的气液两相流^[1]，简称气液两相流。这种现象广泛存在于自然环境、工业生产等各个领域。尤其是在核电站的各种管线中，存在着多种形态的气液两相流。一回路管道中的冷却剂在流动过程中，由于主泵、各类阀门以及弯管接头等因素，不可避免会夹杂着气泡，下图 1.1 展示了竖直管道中汽水混合物常见的四种流态。然而在二回路蒸汽管道中，由于管线中温度和压力的微小变化，也会导致蒸汽中存在着不同份额的液滴。在特定的温度、气压和反应堆运行工况下，气相的湿度变化或者液相中气泡的含量等对于冷却剂的物理描述和反应堆运行状态的评估至关重要。如若不能够及时且准确地为核电站操作人员提供气液两相流的各项参数，那么将无法对核电站整体的运行状况有着准确评价，进而导致核电站操控性降低，甚至会引发核电厂严重事故的发生。因此，在工业过程中对气液两相流流态等参数的实时监测、精确测量是十分重要的。

对于汽水混合物的测量有光学成像、超声成像、电阻抗特性测量等方法，但是考虑到这些方法都对被测物体的尺寸、应用场合以及测量环境都有所限制，因此这些方法在气液两相流的测量中不具有普适性。

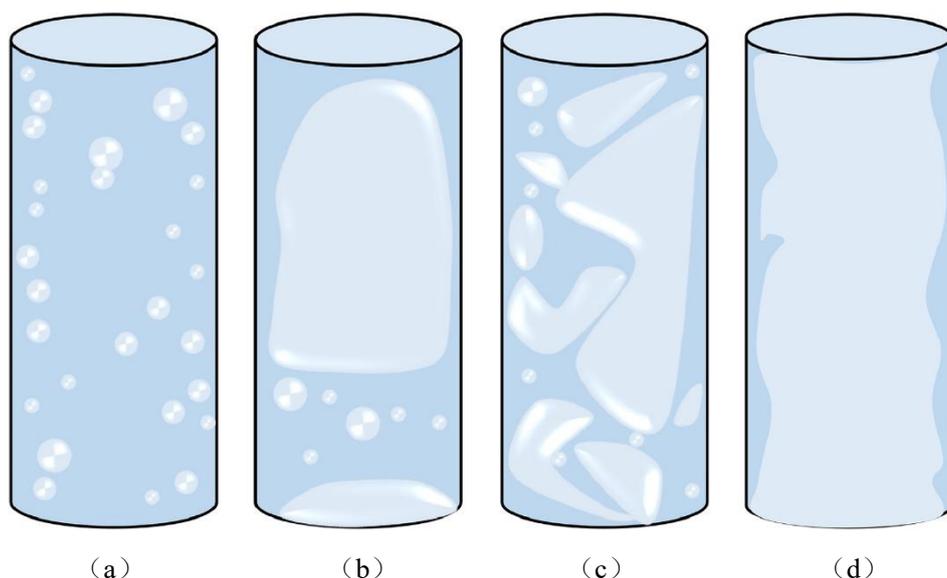


图 1.1 竖直管道中汽水混合物四种流态

针对这一测量需求，过程层析技术中的非侵入性 CT 扫描技术能够满足测量快速瞬态质量流量的所有要求，并且能够给出截面含气率以及汽水混合物的截面分布图。同时

它还具有反应速度快、无创测量等优点^[2]。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 汽水混合物 CT 成像研究现状

自从 1971 年世界上第一台 CT 出现以来，计算机层析成像技术（Computed Tomography）就快速发展起来，并且广泛应用到医疗诊断和科学研究中。过程层析成像技术（Process Tomography, PT）将 CT 技术从医疗领域引入到工业检测中。

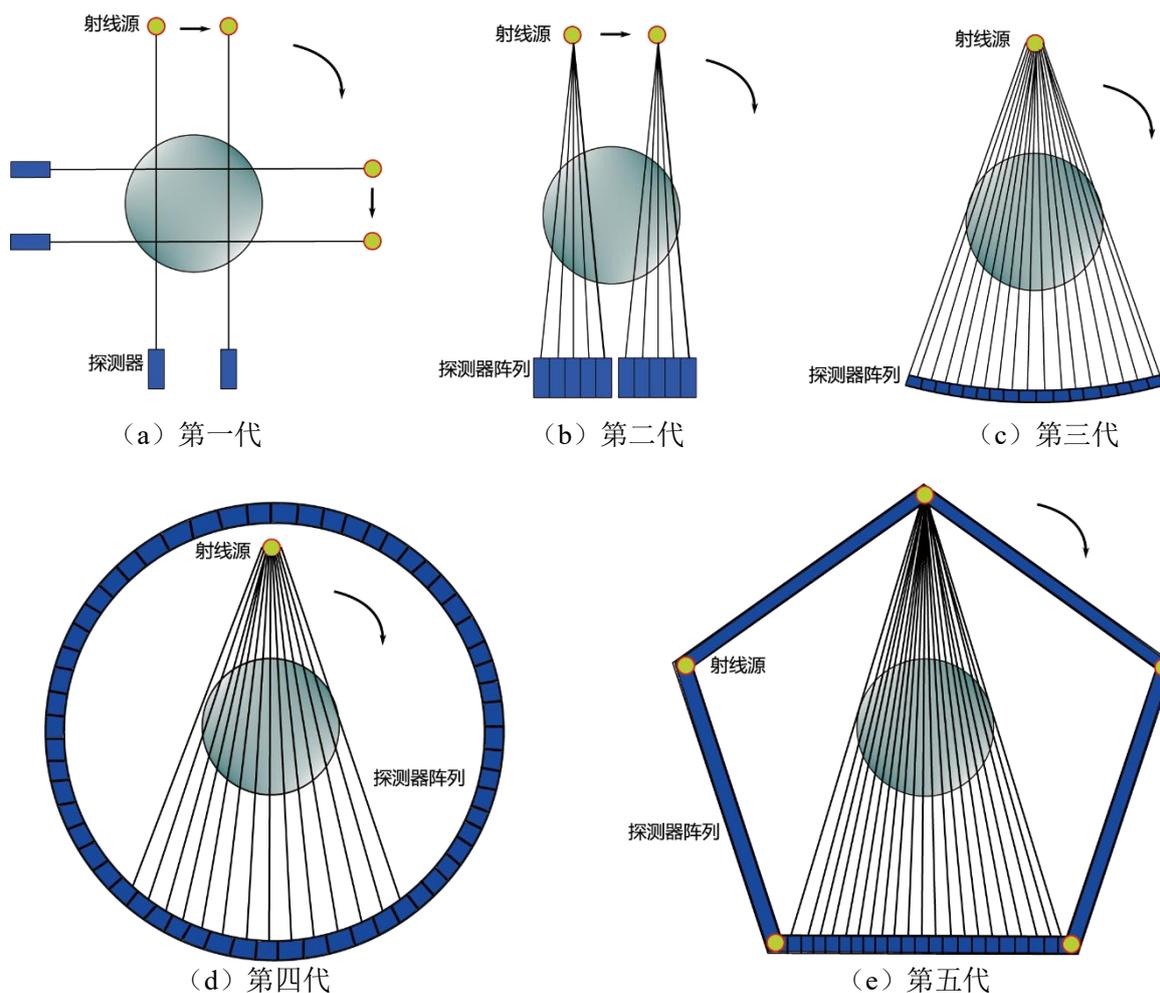


图 1.2 工业 CT 发展史

最早开展的工业 CT 瞬态两相流实验是 1976 年在美国纽约 Mt.Sinai 医学中心完成的，此次实验的目的是利用单能 γ 射线测量气液两相流横截断面的物质分布情况^[3]。在实验中，使用直径为 4 英寸、壁厚为 1/16 英寸的铝制管道，并通过微定滴管将空气吹入管道中心形成两相流体区，从而模拟管道以及流体的结构。为了便于观察内部分布情况，铝管底部装有有机玻璃板。测量机构使用的是 100mCi 的放射性核素 ^{137}Cs ，探测装置则

为 NaI 探测器。这次实验虽然没有对细致描述成像细节，但它推动了将医用 CT 应用到气液两相流检测的进程。

1980 年，美国俄亥俄州立大学的核仪器实验室对气液两相流成像进行了可行性研究。设计出一套新型多相流成像系统，采用第四代医学 CT 结构，所使用的放射源是活度为 18.2mCi 的 ^{137}Cs 点源，等间距分布一周的 48 个 NaI 探测器。该装置可以测量物体的最大直径为 6 英寸，分辨率达到 1.15cm。

1995 年，美国华盛顿大学化学反应工程实验室的 Sailesh B.Kumar 和 Milorad P.Dudukovic 等人成功研发出了一套用于检测截面含气率的 γ 射线成像系统^[4]。此装置为第三代扫描结构，共计 11 个准直后的 NaI 探测器呈弧形排列，中心是辐射源。探测器和源的整个组件安装在一个机架上并通过一个步进电机驱动围绕测试管段的轴线旋转。使用的源是一个封装的 100mCi 的 ^{137}Cs 同位素。这种封装使得它提供了一个在水平面上与 40 度角相对的风扇波束，能够对直径为 2.5cm~45.0cm 的测试区域进行成像。

1998 年，日本三菱重工的 K.Hori 和 K.Kawanishi 等人研制了一种超高速 X 射线计算机断层扫描仪^[5]，克服了传统 CT 扫描仪在瞬态或不稳定状态下出现的问题。该 X 射线 CT 系统使用 60 个 X 射线管以及 584 个探测器共同工作从而减少扫描时间。装置扫描时间为 0.5 毫秒、被测两相流移动速度可达 4.5m/s，毫米级的空间分辨率使得它能够真正用于热工水力动态测量。

2007 年，德国德累斯顿研究中心的 U.Hampel 和 A.Bieberle 小组研发了一种新型的 γ 射线扫描仪^[6]。装置由活度为 165GBq 的 ^{137}Cs 源以及 320 个 LYSO 闪烁体探测器组成，并且能够在短时间内获得解析度为 2mm 的图像。小组在 2008 年设计出另一台用于研究两相流的超高速 X 射线成像系统，属于第五代医学 CT 扫描结构，拥有 240 个 CZD 探测器，成像时间为 1 毫秒。

同年，美国爱荷华州立大学 Theodore J.Heindel、Joseph N.Gray 以及 Terrence C.Jensen 研制了一种独特的基于 X 射线成像的流动可视化设备^[7]，该设备提供数字 X 射线照相和立体成像，可在高达 60 帧每秒的速度下，对多相和不透明流体流动中的三维流动结构进行可视化和时间解析，空间分辨率小于 0.5mm。

2008 年挪威卑尔根大学 BT Hjertaker、R Maad、E Schuster 等人构建了一套实时的 γ 射线成像系统^[8]，由 5 组活度为 500mCi 的放射性核素 ^{241}Am 以及 17 个碲锌镉探测器所组成。其成像速度可达每秒 31 帧，其空间分辨率达到被测管道直径的 10%左右。

2008 年，天津大学控制科学与工程学院射线成像课题组设计完成用于两相流测量的

第一代单放射源-16 探测器 γ 射线成像系统^[9]。同时在 2010 年 9 月，小组成员设计了多源成像系统，由 5 组 ^{241}Am 放射性同位素以及 17 个 CdZnTe 探测器组成，空间分辨率可达 7.1mm ^[10]。

1.2.2 图像重建算法研究现状

当射线穿透被测物体时会因为与不同组分相互作用而使其强度发生衰减，具体的衰减情况会与物体内部不同物质的分布有关，所以便能够利用射线的这一性质反推出被测物体内部的物质分布情况^{[11][12]}。以上这个通过投影将图像重建的过程就被称为 CT 成像。

近年来，随着计算机科学的发展，由投影数据反求出重建图像的算法也得到了迅速发展。算法的优劣对重建图像的质量以及重建速度都起着关键性的作用。根据算法的精度不同，CT 图像重建算法可以大体上分为以下两类^[13]，如下图 1.3 所示。

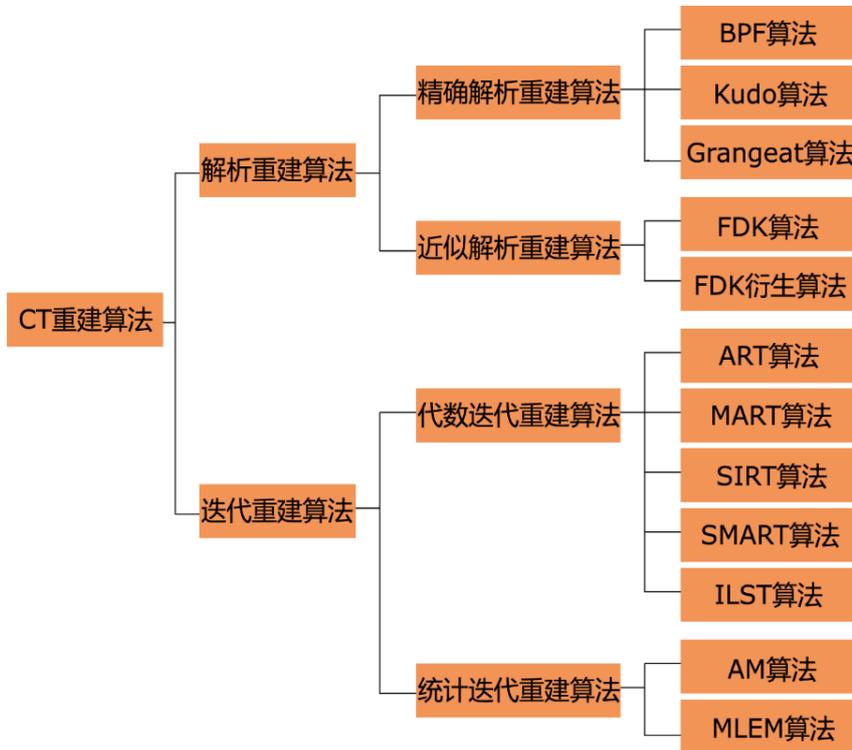


图 1.3 CT 重建算法分类总结

解析重建算法主要是包括滤波反投影法（Filtered Back Projection）、基于 FBP 的三维 FDK 算法等在内的精确算法。这类算法的数学公式较为复杂、复杂度较高，得到质量较高的图像的前提是要获得完备的投影数据^[14]。这意味着使用这类算法获得图像的同时对物理测量同样具有较高的要求。

相对于解析重建算法，迭代重建算法方法更容易通过编程实现^[15]。具体分为两类：代数迭代重建方法和统计迭代重建方法。其中代数迭代重建方法，是通过将实测得到的

数据集与估计值进行比较,求解多个线性方程组,并减小两者之间的差值以求出最终值。这类算法包括代数重建技术^{[16][17]} (Algebraic Reconstruction Technique) 算法、乘法技术 (Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique) 算法、联合乘法技术 (Simultaneous Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique) 算法、迭代最小二乘技术 (Iterative Least Square Technique) 算法以及同步迭代重建技术 (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) 算法。统计方法则是以实测投影数据为均值,通过似然函数的最大化,识别投影的泊松分布函数从而重建出图像。这些方法的例子是交替极小化 (Alternating Minimization) 算法和最大似然-期望最大值 (Maximum Likelihood Expectation Maximization) 算法。这类方法更有其他不可替代的优势体现在投影数据不完全、存在噪声的情况下,依然能够获得较好的图像。但是当划分的像素数目过大时,迭代量将会很大,导致迭代计算时间延长,同时对计算机硬件存在的极大挑战也是不容忽视的。

1.3 存在的问题及本文主要研究内容

总结目前国内外对此领域研究的技术方法,大多数研究都是针对特定尺寸的管道内气液两相流成像而进行的,而对于需要频繁变换尺寸的其他场合下,都不具备普适性。同时,工业中不仅仅需要对气液两相流进行截面成像,还需要对其截面含气率给出较为准确的数据,以便于指导工业生产、设备维修、事故预防等活动。

综上,本文将基于以上国内外研究现状的不足将按照以下研究内容进行展开:

1.首先对核工程领域中设备管道尺寸以及工质所处的温度、压力进行调研,并通过 Geant4 软件模拟,确定 γ 放射源核素的种类。

2.参考资料较为完备的第三代 CT 成像系统,确定包括前准直器、后准直器、弧形探测器阵列在内的其他重要部分,最终设计出满足用于核工程领域气液两相流测量的 γ 射线成像系统——基于 ^{137}Cs 等角度型扇形束成像系统。

3.使用 Geant4 软件将上述系统进行几何建模,并将被测管道的直径设置为 40cm,管道内部的流态为分层流。对被测管道进行 CT 扫描,将得到的多组投影数据通过代数迭代重建算法进行图像重建,并求出相应的截面含汽率。

4.利用多种评价方式对重建得到的图像进行分析与评价,最后将重建图像与原始图像进行对比,说明统计误差、噪声等因素对 CT 重建的影响。

第 2 章 伽马成像技术理论基础

2.1 线衰减系数

入射的 γ 射线经过与物质的相互作用后，其中一部分由于被吸收使得能量降低，一部分被散射同样导致能量降低，最终使得其强度发生衰减。虽然 γ 射线为线状谱，但在本文中只讨论单能窄束射线的衰减规律。

研究表明，能量为 I 的单能 γ 射线，当其穿过厚度为 Δx 的均匀物质时，其强度的衰减量 ΔI 与介质的厚度 Δx 成正比^[18]，其表达式为

$$\frac{\Delta I}{I} = -\mu \Delta x \quad (2-1)$$

其中， μ 是指物质的线性衰减系数，代表射线穿透单位厚度的物质后强度的相对衰减量，其值与射线的能量以及被穿透物质的原子序数有关，其表达式为

$$\mu \propto Z^3 \lambda^3 \quad (2-2)$$

其中， Z 为被穿透物质的原子序数， λ 为 γ 射线的波长。

将物质的线性衰减系数 μ 除以其密度 ρ ，可得到物质的质量衰减系数 μ_m ，表达式为，

$$\mu_m = \mu / \rho \quad (2-3)$$

通过组成待测物质的各元素的质量衰减系数和质量百分比，就可以得到射线穿透待测物质时的质量衰减系数，表达式为，

$$\mu_m = \alpha_1 \mu_{m1} + \alpha_2 \mu_{m2} + \alpha_3 \mu_{m3} + \dots \quad (2-4)$$

式中 μ_{m1} ， μ_{m2} ， μ_{m3} ，……分别为组成物质的各元素的质量衰减系数， α_1 ， α_2 ， α_3 ，……分别为在该物质中各元素所占的质量百分比。本文中主要涉及的物质有空气、水、铝等，它们的衰减系数如下表 2.1 所示。

表 2.1 常用的物质衰减系数（光子能量为 662keV）^[19]

物质	线性吸收系数 (1/cm)	密度 (g/cm ³)	质量吸收系数 (cm ² /g)
干燥空气, Air	≈0.000	0.00129	0.0775
水, Water	0.086	1.000	0.086
铝, Aluminum	0.31536	2.700	0.1168

2.2 CT 图像重建原理

2.2.1 射线投影基础

这里假设入射的 γ 射线是能量单一的，如图 2.1 (a)， γ 射线的初始强度为 I_0 ，穿过均匀材料后强度衰减为 I ，则由比尔 (Lambert-Beer) 定律可得：

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot \Delta x} \quad (2-5)$$

式中， μ 是指材料的线性衰减系数，单位 cm^{-1} 。

若在 γ 射线束所穿过的路径 l 上，物质是非均匀的、由各种不同的成分所组成的，如图 2.1 (b) 所示。那么我们可以将沿路径 l 分布的介质分成一个一个的小单元来计算，厚度为 Δx 。当所划分单元的厚度足够小时，使得每一个小单元可视为均匀介质，这样我们就可以认为 γ 射线在此单元内的衰减系数是一个定值。

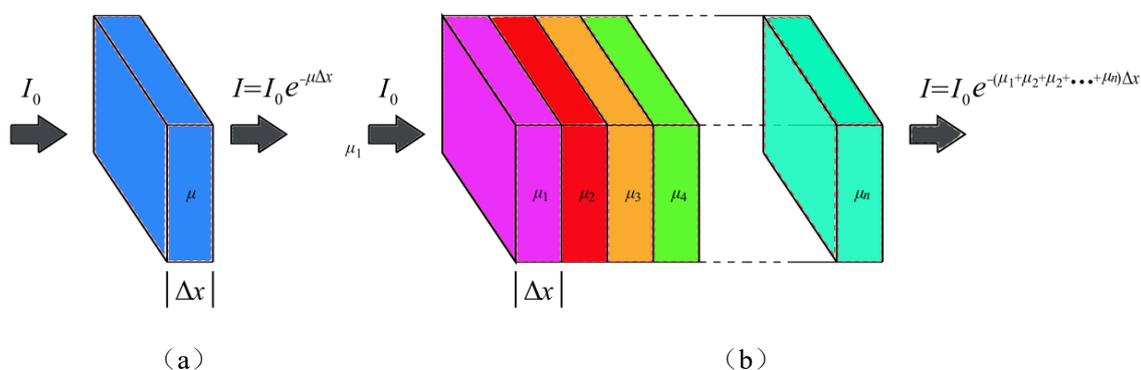


图 2.1 均匀和非均匀物体对单能 γ 射线的衰减作用示意图

那么 γ 射线通过第一个单元后，有

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-\mu_1 \cdot \Delta x} \quad (2-6)$$

通过第二个单元后，有

$$I_2 = I_1 \cdot e^{-\mu_2 \cdot \Delta x} = (I_0 \cdot e^{-\mu_1 \cdot \Delta x}) \cdot e^{-\mu_2 \cdot \Delta x} = I_0 \cdot e^{-(\mu_1 + \mu_2) \cdot \Delta x} \quad (2-7)$$

通过第 n 个单元后，有

$$I = I_n = I_0 \cdot e^{-(\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n) \cdot \Delta x} \quad (2-8)$$

这样，我们可以将 Lambert-Beer 定律可以拓展为上式 (2-8)。可将其改写为以下形式，

$$\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n = -\frac{1}{x} \ln \frac{I_n}{I_0} \quad (2-9)$$

整理得到

$$x \sum_{i=1}^n \mu_i = -\frac{1}{x} \ln \frac{I_n}{I_0} \quad (2-10)$$

上式中是假设每个小单元内的衰减系数相等时的一种表达方式。然而在实际中，沿

着 γ 线束路径上的介质对 γ 射线的衰减系数总是不均匀的，甚至还是连续变化的。因此，上式只是实际情况的一种近似描述。假设物体的线衰减系数是沿着 γ 射线路径 L 且随着 L 连续发生变化的，也就是说线衰减系数是 L 的函数，那么式 (2-10) 可写成对函数变化的积分形式，

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} f(s) ds = -\ln \frac{I}{I_0} \quad (2-11)$$

式中， P 是定义的 γ 射线穿透介质的投影值。

2.2.2 Radon 变换及逆变换

在 1917 年，奥地利数学家雷唐 (Radon) 在研究过程中寻找到从函数的线积分到重建该函数的求解方法，推倒并证明出了具有里程碑意义的 Radon 变换和 Radon 反变换。这套理论一直是 CT 图像重建技术的重要数学基础^{[20][21]}。

Radon 变换及其反变换是通过获得很多个不同扫描角度下的一组一维投影数据，并根据得到的投影数据重建出物体断层截面的二维物场分布图像。Radon 变换思想可以参照下图 2.2，以下是其数学描述，

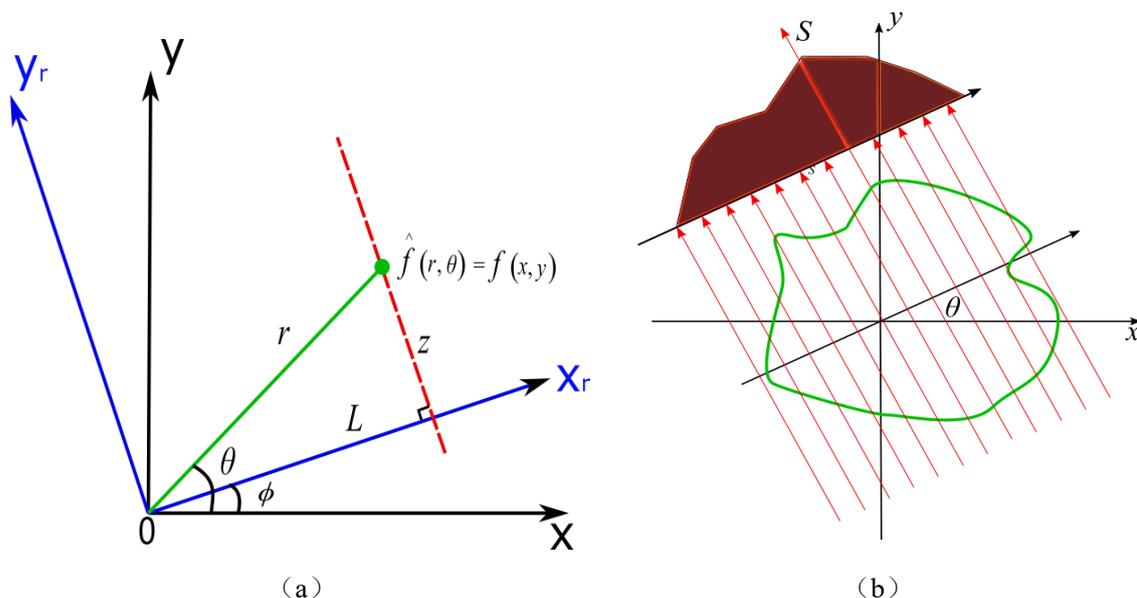


图 2.2 Radon 变换坐标系统

我们假设已知的某一函数 $f(x, y) = \hat{f}(r, \theta)$ 沿着直线 z 的线积分为：

$$\begin{aligned} P &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) dz \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(r, \theta) dz \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}\left(\sqrt{l^2 + z^2}, \phi + tg^{-1} \frac{z}{l}\right) dz \end{aligned} \quad (2-12)$$

则有,

$$\hat{f}(r, \theta) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\pi \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{r \cos(\theta - \phi) - l} \frac{\partial P}{\partial l} dl d\phi \quad (2-13)$$

上式 (2-12) 即为 Radon 变换, 式 (2-13) 为 Radon 反变换。

基于 Radon 变换及其反变换, 二维图像重建过程可以这样描述: 首先通过对被测物质进行多个角度的照射获得相应直线的线积分的投影值, 再使用 Radon 逆变换, 就能够得到被测物质截面分布, 其数学表述为

$$P_\theta(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - t) dx dy \quad (2-14)$$

图像重建的任务其实就是由各个方向不同位置的投影值 $P(t)$ 恢复出原始图像的分布函数 $f(x, y)$ ^[22]。

2.3 图像重建算法

CT 系统图像重建是指由放射源发出射线穿透被测物场 (管道或者容器), 再通过机械旋转扫描系统以获得多组被测物场的投影数据, 最终反推求得被测物场内部各点的线衰减系数值这一过程。

系统工作时, 首先是由放射源发射出一定量的 γ 射线, 利用前准直器将发生过散射的粒子进行滤除, 以便与将 γ 射线准直为朝向某一指定方向的窄束, 当射线穿过被测物场强度降低后, 被后准直器后的探测器阵列所感知, 再通过信号处理部分完成对数据的采集工作, 这样就完成了指定角度的物场扫描。重复以上过程, 得到足够多组投影数据后, 即可通过相关图像重建算法, 反求出被测物场内部介质分布的信息。

2.3.1 扇形束图像重建算法

常见的扇形束的形式有以下两种, 分别为等间距射线型和等角度射线型^[23], 主要是由于这两类的探测器摆放方式不同。在等间距射线型中, 相邻两个探测器单元的距离是相等的, 如图 2.3 (a) 所示。在等角度射线型中, 所有探测器单元是以放射点源为圆心放置在一段弧线上的, 相邻两个探测器单元的角度差值是一定值, 如图 2.3 (b) 所示。

根据对投影数据处理方式的不同, 扇形束图像重建算法主要是分为两类: ①扇形束投影直接重建算法: 利用此算法进行处理时, 只需要对数据进行适当的加权即可。②扇形束投影重排重建算法: 与前一种算法不同的是, 利用它进行求解时, 要求将得到的扇形投影数据通过一系列的调整, 转换为与之对应的平行投影数据。

第二类算法相对于第一类算法较为复杂且需要一定的约束条件，必须明确扇形束投影视角大小以及相邻扇形束之间的增角。

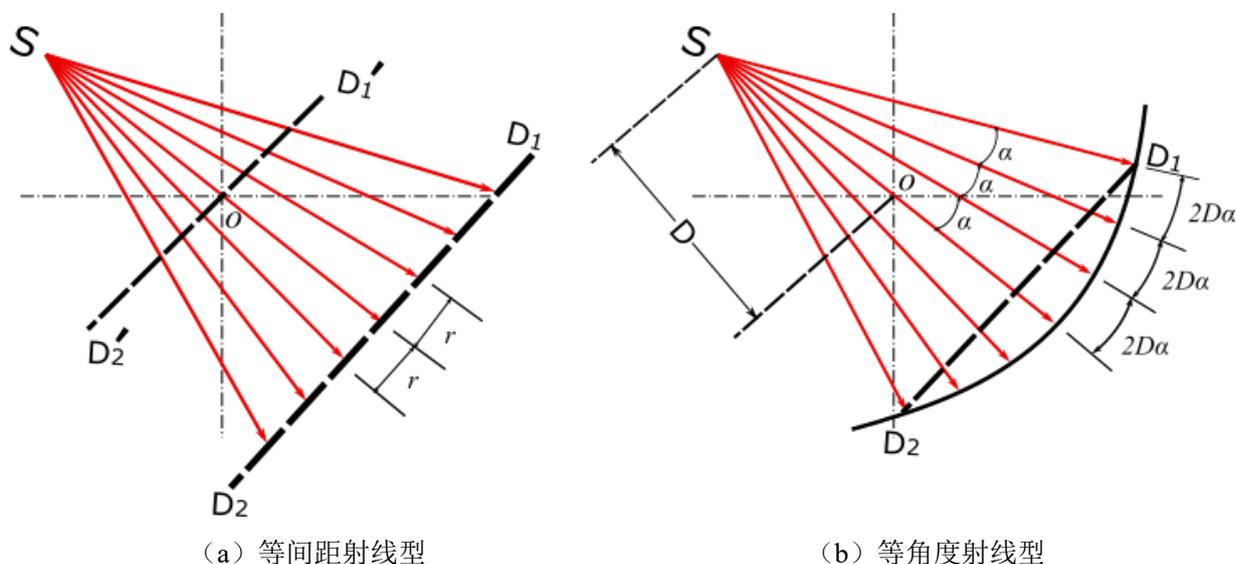


图 2.3 扇形束的两种形式

本文主要对等角射线型系统结构进行研究，下文部分也侧重对等角射线型扇形束图像重建算法详细展开。

2.3.2 代数迭代算法

代数迭代重建算法 (Algebraic Reconstruction Techniques, ART) 也称为直接重建算法。其基本思想可以这样描述：首先对被测图像假设一组初始值，然后将假定的初始值与实际测量得到的投影值加以比较。判断两者的差值是否满足提前设定的误差范围内，如果满足则迭代结束，否则，将以上两者之差作为修正值，根据迭代公式修正准则，不断重复进行“比较、修正”这一过程以减少计算值与实测值之间的误差。当二者的误差在设定的允许范围内时，迭代完成，从而得到重建后的图像。

相对于其他重建算法，代数迭代重建算法最大的优势是在有限投影以及无法得到被测物体先验信息的情况下^[24]，依然能够得到伪影较少、噪声性能更优的图像。同时经过多次迭代修正，在一定误差范围内能够得到相对质量较高的图像。

迭代重建算法因修正因子不同而有多种类型，这里主要对一种通过加型逐线校正的迭代算法。算法实现的步骤如下图 2.4 所示。

(1) 计算出加权修正因子矩阵 R

在迭代的过程中，假设射线束是有一定宽度的线条，而不仅仅是极细的射线。同时，当射线穿透物场时，所覆盖的像素面积会影响射线投影值的数值，而其影响的程度是通

过加权修正系数 r_{ij} 来体现。因此，像素 j 对射线 i 的投影的贡献可以表示如下，

$$P_{ij} = r_{ij}x_j \quad (2-15)$$

因此，被测物场中所有像素的单元对射线 i 投影的贡献和为

$$P_i = \sum_j P_{ij} = \sum_j r_{ij}x_j \quad (2-16)$$

其中， P_i 是第 i 条射线的总投影值，即探测器上所接收到的数据； x_j 是第 j 条射线的像素值（灰度值或者密度值）。

上式 (2-16) 可用矩阵表示如下

$$P=RX \quad (2-17)$$

这里有，

$$P=[p_1, p_2, \dots, p_m]^T \quad (2-18)$$

$$R=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

$$X=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (2-20)$$

这里 r_{ij} 定义如下

$$r_{ij}=\begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 号射线经过第 } j \text{ 号像素;} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2-21)$$

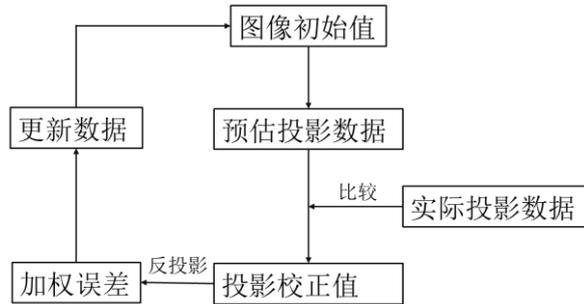


图 2.4 迭代重建的计算流程

(2) 假设图像初始矩阵 X

设定一组图像的初始值是算法进行的第一步，而选择适当的初始矩阵 有利于提高图像重建的效率。本文中并没有对这一因素进行细致的研究，因此选择了最为简单的方法，即令

$$X_0=[0] \quad (2-22)$$

(3) 迭代计算过程

这里的迭代计算主要是为了通过 $X^{(k)}$ 求出 $X^{(k+1)}$ ，要想求出 $X^{(k+1)}$ 则需要在已知 $X^{(k)}$ 的基础上加入误差值 $\Delta x^{(k)}$ 。其中， $\Delta x^{(k)}$ 仅仅只是考虑一条射线对投影值的贡献。然后继续进行下次迭代，直至所有射线投影都完成了数据的修正。这里用到的修正公式为，

$$X^{(k+1)} = \begin{cases} X^{(k)}, & r_{ik}^T x^{(k)} \leq p_{ik}; \\ X^{(k)} + \lambda(k) \frac{p_{ik} - r_{ik}^T x^{(k)}}{\|r_{ik}\|^2} r_{ik}, & \text{其他;} \end{cases} \quad (2-23)$$

$$i_k = k(\bmod I) + 1 = \left[k - \text{Int}\left(\frac{k}{I}\right)I + 1 \right] \quad (2-24)$$

式中 k 指迭代次数， Int 是指向下取整运算。

(4) 获得最优图像数据

经过多次迭代后，当迭代后的数据与实际得到的投影数据之差在误差允许范围内时，迭代即结束，最终得到的 $X^{(k)}$ 就是重建后的图像数据。

ART 能够适用于多种情况，如在投影角度有限、投影角度不均匀、数据缺失的情况下都可以重加出图像。虽然矩阵的计算量过大导致占用内存较多，进而使得重建时间过长，但随着计算机运行速度的提高，算法收敛速度慢以及迭代时间久的问题也能够被解决。

2.4 本章小结

本章主要介绍了伽马成像技术理论基础。首先引入线性衰减系数这一概念，列举了对于能量为 662keV 的 γ 射线一些物质的线性衰减系数与质量衰减系数，由射线穿过均匀物质衰减规律推导出穿透非均匀物场时的强度衰减公式，引入射线投影的概念。射线投影其实是函数积分的一种形式，为了方便求解，利用 Radon 变换及其逆变换加以解决。

基于本文所设计的 γ 成像系统——第三代扇形束扫描结构，对扇形束等角射线型算法进行了介绍。图像重建算法中的代数迭代图像重建算法独特的重建思路，使得在投影角度有限的情况下依然能够得到较高质量的图像。这里详细叙述了算法实现的具体步骤，为下文的程序编写以及图像重建提供了理论支撑。

第 3 章 Geant4 软件介绍与系统设计

为了验证所设计的 γ 射线成像系统在核工程领域内的使用效果，本文根据被测管道及内部流态等特点，完成了汽水混合物伽马成像系统三维空间物理模型的建立。为了方便地探究这套系统的实际工作情况以及降低成像系统搭建所需的费用，文中选择通过软件进行初步的仿真。考虑到实际情况中射线的产生和传输过程都并非确定的，而是随机的，因此可以使用基于蒙特卡罗方法的 Geant4 仿真软件对射线的物理过程进行模拟，进而对所设计的设备实际效果作出初步的评价。

3.1 Geant4 仿真工具包

由于放射性射线也是一种电磁波，及同样具备波粒二象性。那么可以利用符合射线粒子运动特性的数学模型——随机概率统计方法来模拟粒子的产生、运动等过程。当前主要是通过蒙特卡罗方法（Monte Carlo Method）对射线进行仿真模拟^[25]。蒙特卡罗方法又称为随机抽样技巧或统计试验方法，是一种以概率统计理论为基础的方法，能够较为逼真地描述事物的特点以及物理实验过程，其优势在于解决一般数值方法难以解决的问题，如这里所要模拟的高能粒子输运的过程。

3.1.1 Geant4 简要介绍

Geant4 是由欧洲核子研究中心（CERN）开发的一款包含各类粒子、探测器描述以及模拟工具的软件包^[26]，是一种用于模拟射线粒子与物质相互作用的通用蒙特卡罗仿真软件工具包。由于其复杂的物理组件以及在几何描述方面的高级功能，被广泛应用于从高能物理到医学物理、空间科学领域的辐射物理研究。随着高能物理实验复杂度的日益增加，利用 Geant4 仿真模拟已成为结构设计、优化和实验数据获取、分析、重建等不可缺少的手段。

软件是采用 C++ 语言面向对象模式进行编写的，基于模块化、可操控性强等特点，通过对用户特定需求进行编程，可以利用 OpenGL 等软件对粒子的产生、输运、轨迹跟踪以及与物质的相互作用的过程可视化，以便于科研人员直观操作。同时使用该软件在对系统中所使用的的物质进行定义时，通过调用内部已存在的基本元素库文件即可完成。与此同时，仿真过程中调用粒子输运以及与物质相互作用等各类物理过程，以实现粒子碰撞、散射、轨迹分布及数据获取等内容。

3.1.2 Geant4 程序结构

Geant4 仿真工具包提供了嵌入在灵活结构中的全面探测器和物理建模功能。它的核心包括跟踪、几何描述和导航、材料说明、物理过程的抽象接口、事件管理、运行配置、用于跟踪优先级的堆叠、用于处理探测器响应的工具、外部框架、图形和用户界面系统的接口^[27]。使用 Geant4 进行仿真模拟的过程为：（1）通过软件对指定系统进行编程；（2）通过对程序的编译来调用工具包内的不同模块功能；（3）运行程序从而获得所需要的数据结果，完成仿真。具体程序模块结构如下图 3.1 所示。

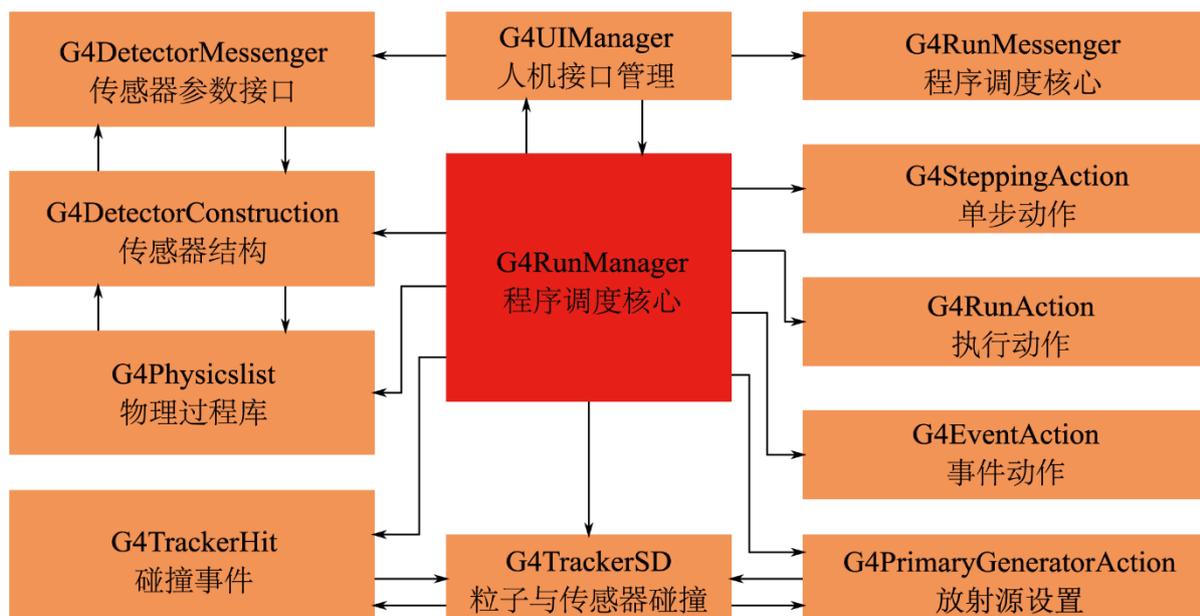


图 3.1 Geant4 程序模块结构图

结合上述结构图，若要实现模拟仿真过程，则需要先在 G4PhysicsList 中对模型的物理几何结构、所处位置以及组成材料进行详细描述，在 G4DetectorConstruction 内将探测器结构及布置情况按要求进行设置。而 G4RunAction、G4EventAction、G4SteppingAction 则是对系统行为的定义，包括设定整体或者局部作用、数据输入输出等内容。G4PrimaryGeneratorAction、G4TrackerHit、G4TrackerSD 文件能够实现对放射源能量、运动过程以及与物质相互作用过程的设定。这些文件统一由 G4RunManager 按需求进行选择性调用，最终获得各类数据，从而达到用户所需的模拟过程。

3.2 汽水混合物伽马成像系统的建立

3.2.1 系统模型

本文中设计的汽水混合物 γ 射线成像系统是基于美国华盛顿大学化学反应工程实验室研发的 γ 射线成像系统，仍然采用第三代扇形束扫描结构，但是在部分装置以及具体尺寸上有所修改，以便于该系统能够更好地应用到核工程领域中。

下面将从放射源和探测器的选择、放射源-被测物场-探测器尺寸的确定以及准直器的设计这几个方面对系统进行较为详细地介绍。

(1) 放射源的选择

在工业实际应用中，常用的 γ 射线源主要有以下这些放射性核素，即 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 $^{239/240}\text{Pu}$ 、 ^{241}Am 。这些元素对应的 γ 射线能量如下表 3.1 所示。

表 3.1 常用 γ 射线源的能量

放射性核素种类	^{60}Co	^{137}Cs	$^{239/240}\text{Pu}$	^{241}Am
对应 γ 射线能量 (keV)	1117	662	17	59.5
水的线衰减系数 μ (cm^{-1})	0.068	0.086	1.302	0.207
水中的半衰减厚度 $x_{1/2}$ (cm)	10.19	8.06	0.53	3.35

通过上表可以发现， ^{60}Co 相对于另外三种放射性核素，由于能量超过 1MeV，使得其过强的穿透能力并不适用于气液两相流的测量，且难以进行辐射防护。考虑到被测管道内部主要是对汽水混合物进行成像，由于空气的线衰减系数过小可以忽略，那么根据对比上述不同能量的射线在水中的线衰减系数以及半衰减厚度，可以明显看出 ^{137}Cs 相对于另外两种放射源突出的优势。因此在本文所设计的成像系统选用一个封装的活度为 100mCi 的 ^{137}Cs 点源作为放射源部分。

(2) 探测器的选择

由于同位素源的光子发射率相对较低， γ 射线探测器应该在脉冲计数模式下工作。这种模式的优点是对 γ 光子的能量敏感检测，这样使得滤除那些由于检测前发生散射或在探测器中因康普顿相互作用而未能保留其原始发射能量的光子成为可能。此外，预期的低计数率要求探测器材料具有较高的探测效率。下面列出了探测器需要达到的性能要求^[28]：

①计数效率是最重要的参数，因为光子数受源活动的限制，所以计数效率应尽可能高。

②能量分辨率应该尽可能高。但是为了提高计数效率并减少死区时间，对能量分辨率要求可以放宽一些。闪烁探测器能量分辨率是指当核辐射探测器的脉冲幅度与入射粒子沉积能量之间有一定的对应关系时，探测器能谱中对应单能量入射辐射的峰分辨率。

③闪烁体稳定性强。在不进行重新校准系统的情况下，能够在较长时间内进行测量，稳定性是非常重要的。

基于以上要求，最终选用 NaI 闪烁体探测器阵列作为探测部件。 γ 射线与其相互作用的三种机制截面较大，并且可以制成大体积状，所以对 γ 射线的探测效率和能量分辨率表现都较好。尽管成本问题是影响设计决策的一个很重要的因素，但是因为目前尚处于设计阶段，所以不会在这里讨论成本问题。

(3) 放射源-被测物场-探测器尺寸的确定

为了让该系统能够测量直径为 40cm 的大管径管道，就要保证放射源、被测管道、探测器阵列三者间的距离。基于这些要求，被测物场的中心距离放射源的尺寸为 $L_1=60\text{cm}$ 。

NaI 探测器阵列是在以放射源为中心半径为 90cm 的一段圆弧上，每个探测器窗体的尺寸为 2 英寸（宽） \times 2 英寸（高），且每个窗体中心正对着射线源摆放，即 $L_2=90\text{cm}$ 。

(4) 准直器的设计

在整个成像系统中，准直器是极为重要的部件，其功能是用于降低散射的干扰从而提高分辨^[29]。准直器包括前准直器以及后准直器，两者的功能有所不同。

介于放射源和被测物场之间的是前准直器，主要是用于把射线发出的锥形束整型为厚度较小的扇形束，由于所选的放射源已被封装为张角为 40° 的扇形束，因此不需重复设置前准直器。

后准直器是位于探测器之前的部件，其功能是为穿过前准直器的射线束到达探测器提供通道，并且将因散射而偏离轨道的粒子过滤，从而降低散射光子对探测器计数的影响。由于被测物场是处于放射源与探测器阵列的之间，当被测管道直径达到 40cm 时，只有其中的 11 个 NaI 探测器能够在 40° 的扇形束内探测到光子。如果只是这样的结构，那么在扫描时一个视角只能得到 11 组投影数据，不仅导致空间分辨率过低，而且后期将会出现成像因为数据量不够导致重建图像质量低甚至无法成像的情况发生。

这里采用一种新的方法，利用后准直器来间接性地增加圆弧中探测器单元的数量。具体实现方法是在后准直器适当位置上对应每个探测器开一个 $5\text{mm}\times 10\text{mm}$ 的矩形孔，对于每个固定的投影视角，使后准直器沿着探测器圆弧同心圆旋转，这样每个探测器将会采集多组投影数据，而且每个投影都是唯一的，也就等效于增加了探测器单元的数量。然而，所付出的代价是以增加扫描时间的形式出现的（扫描时间与探测器采样的额外射线的数量成正比）。由于此系统目前未进行硬件设计，因此并未研究额外射线数量对装置扫描时间的影响。

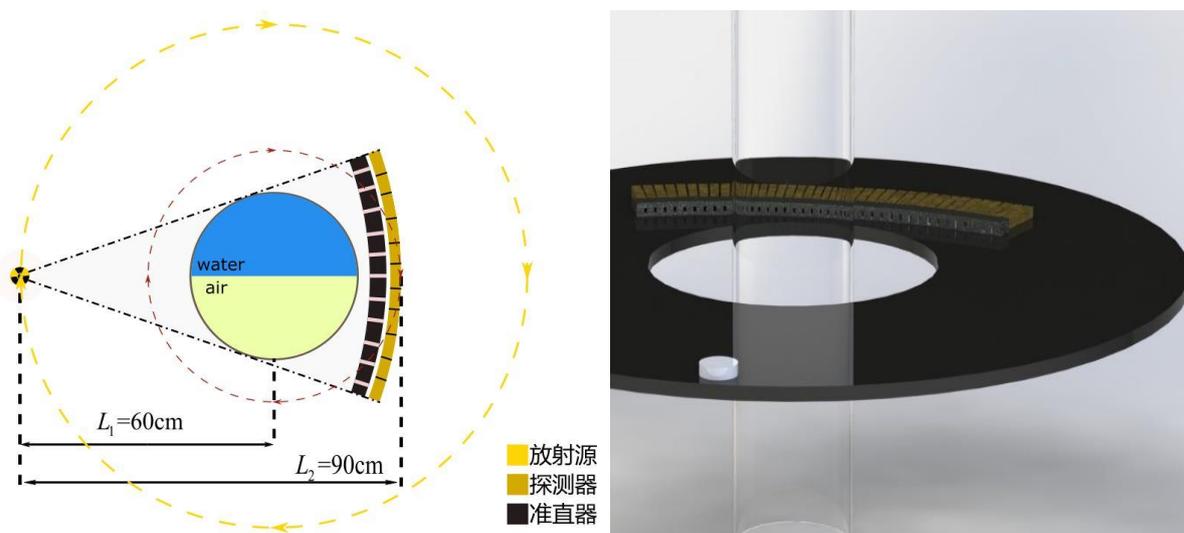
至此，本次设计的用于汽水混合物 γ 成像系统模型已经完全建立，其结构尺寸信息

如下表 3.2 所示，工作示意图如下图 3.2 所示。

表 3.2 系统结构尺寸参数表

单位: cm

项目名称	数值	项目名称	数值
放射源与被测物场距离	60	放射源旋转半径	60
探测器与被测物场距离	30	探测器旋转半径	30
铝制管道的厚度	0.5	铝制管道的外径	2.5~40



(a) 成像系统俯视示意图

(b) 成像系统三维渲染图

图 3.2 汽水混合物伽马成像系统装置模型图

3.2.2 建模过程

首先使用 Geant4 软件包对上面所设计的成像系统模型进行物理模型的搭建，程序代码的编写是基于工具包中所提供的 exampleB1 这个样例，具体做法主要是在以下几个文件中进行设置。

①在 B1DetectorConstruction.cc 文件中对被测物质组分的材料及尺寸、放射源-被测物场-探测器的具体尺寸等进行准确的设定。选用的被测管道为直径为 40cm、壁厚为 5mm 的铝制管，管长 40cm，管道内部的流态选用水平管道中常见的分层流这一流型。为了便于在软件中几何建模，采取气相和液相上下等体积分布的方式。

②在 B1PrimaryGeneratorAction.cc 文件中对放射源核素、能量等参数进行详细的设定。设定放射源为直径为 3mm、能量为 662keV、活度为 100mCi 的 ^{137}Cs 点源。同时设置粒子发射的水平张角为 40° ，竖直张角为 2° ，确保发射的粒子为扇形束分布的同时

也加快了程序的运行速度。

③在 B1Stepping.cc 文件中对探测器接收粒子的情况进行设置，这里认为探测到的有效粒子需要满足至少两个条件：第一，必须是放射源发出的 γ 光子，否则粒子计数无效；第二，接收到的粒子必须是第一次到达探测器就被探测到，而非存在其他途径，这样可以避免粒子在探测器内部继续发生相互作用而导致计数出现较大的偏差。

④通过对 B1Event.cc、B1RunAction.cc、B1Stepping.cc 这三个文件的修改，程序运行过程中，它们会相互嵌套调用，最终输出所需要的包括 EventID、StepID、PreStepPoint、DetectorName、ParticleName、Counter 在内的探测器计数数据。

3.3 仿真数据获取与处理

3.3.1 划分被测物场

由上述 2.2.1 节射线在非均匀物质的衰减规律可以知道，对于任意一组投影， γ 射线在被测物场中发生的强度衰减都可以用以下表达式表述，

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu_{Aluminium} \cdot x_{Aluminium} - \mu_{Water} \cdot x_{Water}} \quad (3-1)$$

取对数后，有

$$\mu_{Aluminium} \cdot x_{Aluminium} + \mu_{Water} \cdot x_{Water} = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = P_n \quad (3-2)$$

式中， $x_{Aluminium}$ 是指射线穿过铝制管壁的厚度， x_{Water} 是指射线穿过管内水的厚度， P_n 为投影值。

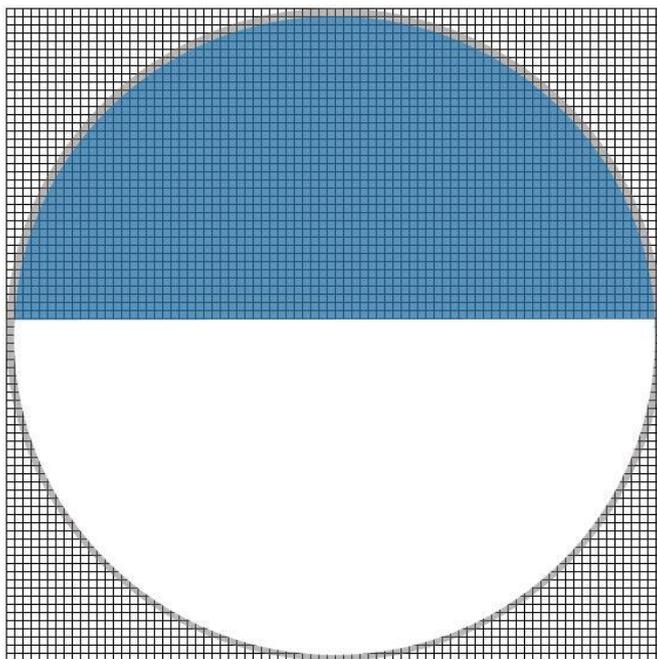


图 3.3 80×80 网格划分示意图

为了便于建立投影数据的线性方程组，需要将物体作出规则的离散化处理。考虑到系统成像的被测管道的最大直径为 40cm，于是将以被测管道圆心为中心、边长为 40cm 的正方形平板划分为 80×80 个正方形像素单元，每个像素单元的尺寸则为 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ ，如图 3.3 所示。将所有像素单元进行编号，先是第一行从左到右编号为 1 到 80，第二行从左到右编号为 81 到 160，以此类推，最下面一行编号为 561 到 640。同时规定每个像素单元的像素值的大小反映了 γ 射线在该物质内的线性衰减系数，即

$$f_{i,k} = \mu_{i,k} \quad (3-3)$$

其中 i 和 k 分别代表像素单元所对应的的行编号和列编号。

因此，对被测物质组分图像重建的方法其实就是对上述共 6400 个像素单元的各个像素值（灰度值或密度值）进行求解，即归结为求出被测物质矩阵 F 。

3.3.2 确定扫描方式

为了获得高质量的重建图像，获得足够多的数据是最基本的。因此，这里选用 90 个视角对被测物场进行 $0^\circ \sim 180^\circ$ 半周等角度间距扫描模式，即每条射线角间隔为 2° 。同时对于每一个扫描视角，通过等角度间隔旋转后准直器，能够获得 39 个投影数据。这样经过一次半周扫描，得到的总投影数据为 90×39 组。

3.3.3 设置射线矩阵

由于投影是射线组与被测物场之间相互作用的结果，也就是说存在着数学关系。因此，首先需要将每条射线在被测物场所划分的网格中，即射线也将使用 80×80 个正方形单元构成。与被测物场不同的是，由于每一条射线中只有很少的单元与之相交，这也意味着射线矩阵的是一个大部分矩阵元为零的矩阵，只有射线经过的单元取值为 1。因此每条射线的矩阵用数学表达式可以表示为，

$$R = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \cdots & r_{1,80} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \cdots & r_{2,80} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{80,1} & r_{80,2} & \cdots & r_{80,80} \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

其中， $r_{i,j}$ 的定义与上式 (2-21) 的定义是相同的。

通过上述定义，可以根据射线与被测物场轴心所在直线的夹角 θ 来确定射线方程。射线的确定方式设所划分的 80×80 网格的边长为 L ，那么射线方程可按照以下步骤进行求解，如下图 3.4 所示。

通过上图可以发现由于所有射线都是由放射源 O 发出，那么所有射线所在直线必定

会通过点 $(L/2, -L)$ 。根据所设置的 39 个投影角度，就可以确定每一条射线所在的直线方程。

对于射线 R ，所在直线与被测物场轴心 O' 所在直线的夹角为 θ ，射线到轴心的距离为

$$D=OO' \cdot \sin \theta=(L/2+L) \times \sin \theta \quad (3-5)$$

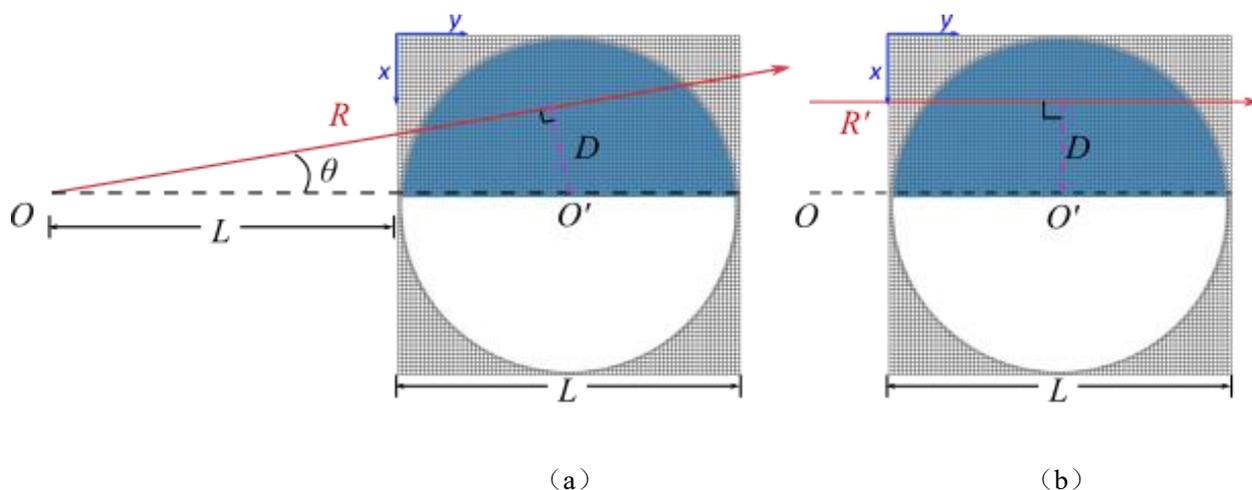


图 3.4 射线方程求解示意图

射线 R 可被认为是由射线 R' 绕轴心 O' 逆时针旋转角度 θ 得到的，因此可以先求出射线 R' 方程进而求出射线 R 方程。射线 R 的方程为，

$$X=\frac{L}{2}-D=\frac{L}{2}-(L/2+L) \times \sin \theta \quad (3-6)$$

将此直线方程逆时针旋转角度 θ 后，即可得到射线 R 的方程为，

$$y=\left(\frac{L}{2}-x\right) \tan \theta-L \quad (3-7)$$

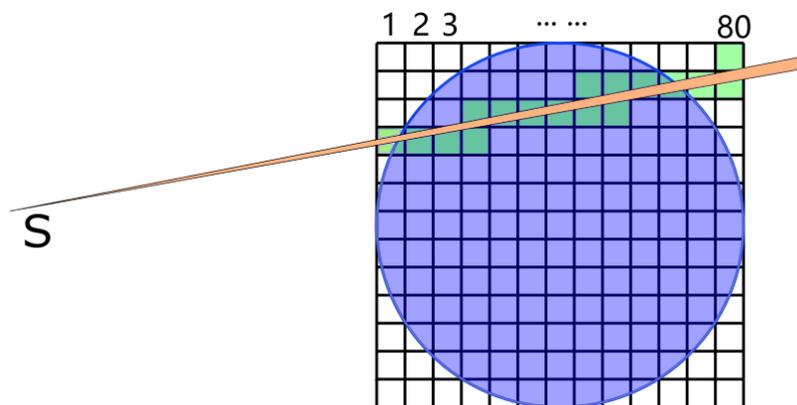


图 3.5 射线矩阵定义示意图

这意味着射线 R 的矩阵，对于每一个单元，如果行号 i 和列号 j 符合上式 (3-7)，

那么对应的 $r_{i,j}$ 值为 1，否则为 0。以此类推，其余射线都是用上述方法求出其对应的矩阵，示意图如上图 3.5 所示。

3.3.4 建立方程组

若要得到每条射线穿过被测物场的投影值，那么就需要将射线矩阵 R 与被测物场矩阵 F 中对应元素相乘并求和，即

$$R * F = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \cdots & r_{1,80} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \cdots & r_{2,80} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{80,1} & r_{80,2} & \cdots & r_{80,80} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} f_{1,1} & f_{1,2} & \cdots & f_{1,80} \\ f_{2,1} & f_{2,2} & \cdots & f_{2,80} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{80,1} & f_{80,2} & \cdots & f_{80,80} \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

$$= \begin{bmatrix} r_{1,1} \cdot f_{1,1} & r_{1,2} \cdot f_{1,2} & \cdots & r_{1,80} \cdot f_{1,80} \\ r_{2,1} \cdot f_{2,1} & r_{2,2} \cdot f_{2,2} & \cdots & r_{2,80} \cdot f_{2,80} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{80,1} \cdot f_{80,1} & r_{80,2} \cdot f_{80,2} & \cdots & r_{80,80} \cdot f_{80,80} \end{bmatrix}$$

$$P = \sum_{i=1}^{80} \sum_{j=1}^{80} r_{i,j} \cdot f_{i,j} = \sum_{i=1}^{80} \sum_{j=1}^{80} r_{i,j} \cdot \mu_{i,j} \quad (3-9)$$

上述 $R * F$ 是 R 与 F 的哈达马积 (Hadamard product)，得到的矩阵的元素是两个矩阵对应元素的乘积，再将所得矩阵中所有元素的求和就得到了射线投影值。

3.3.5 代入迭代算法

根据 2.3.2 节代数迭代算法的思想，结合本系统射线扫描情况，该算法的具体使用步骤如下。

(1) 设定图像初始矩阵 F_0

因为适当的初始矩阵 F_0 有利于提高图像重建的效率，再根据被测物场主要成分为汽水混合物，两者的线性衰减系数值分别为 0、0.086，所以选择介于二者的中间值 0.05 作为初始矩阵 F_0 的元素值，即

$$F_0 = [0.05]_{80 \times 80} \quad (3-10)$$

(2) 迭代过程

这里的迭代主要是利用 $F^{(k)}$ 求出 $F^{(k+1)}$ ，要想求出 $F^{(k+1)}$ 则需要在已知 $F^{(k)}$ 的基础上加入误差值 $\Delta f^{(k)}$ 。其中， $\Delta f^{(k)}$ 仅仅只是考虑一条射线对投影值的贡献。然后继续进行下次迭代，直至所有射线投影都完成了数据的修正。这里用到的修正公式为，

$$F^{(k+1)} = F^{(k)} + \Delta f^{(k)} \quad (3-11)$$

$$\Delta f^{(k)} = R \frac{\sum R * F^{(k)} - \sum R * F}{\sum_{i=1}^{80} \sum_{j=1}^{80} r_{i,j} \cdot r_{i,j}} \quad (3-12)$$

上式中， R 为每一条射线矩阵， F 为被测物场的真实线性衰减矩阵， $\sum R * F^{(k)}$ 和 $\sum R * F$ 分别代表重建中物场的射线投影值总和和真实物场的射线投影值总和。 $\Delta f^{(k)}$ 则代表将两个射线投影值的差值重新分散到射线所经过的物场像素单元中去。通过多次迭代后，就可以得到质量相对较高的重建图像。

3.4 本章小结

本章主要介绍了一款基于蒙特卡罗方法的 Geant4 仿真软件工具包，并且根据成像系统的详细情况阐述了程序文件的编写以及从数据的获取方式到算法实现的整个过程。首先根据放射性射线具有波粒二象性这一性质，选择使用蒙特卡罗方法进行仿真模拟，进而引入 Geant4 软件工具包。通过对工具包程序结构模块的划分与讨论，了解到各个模块的具体作用以及它们之间的相互联系。紧接着就是对汽水混合物伽马成像系统各个功能部分参数信息的详细介绍，包括放射源和探测器的选择、“放射源-被测物场-探测器”尺寸的确定以及准直器的设计，最终获得满足成像要求的完整装置。此时，一旦系统模型确定好后，就可以将系统各部分的详细参数通过编程语言在 Geant4 中完成模型的搭建。进而通过对放射源发射粒子情况以及探测器接收粒子情况的设定，即可获得所需要的模拟数据。

得到仿真数据后，需要对这些数据进行一定的处理。这要结合系统扫描情况进行调整，要求对被测物场进行网格划分、确定扫描方式、设置射线矩阵等步骤，然后建立方程组，最终代入所使用的的代数迭代算法进行计算，获得迭代后的被测物场物质分布情况。

第 4 章 模拟结果分析与评价

4.1 模拟结果及评价

4.1.1 汽水混合物截面物质分布

通过上述多次迭代计算，可以由仿真得到的射线投影值反推得到被测物场的物质分布情况，即在所划分的 80×80 网格中不同物质的线性衰减系数分布。同时所得到的重建图像质量的高低与迭代计算的次数也有一定的关系，下图 4.1 中分别显示了迭代 10 次、50 次、100 次、500 次所得到的被测物场（分层流）重建图像。

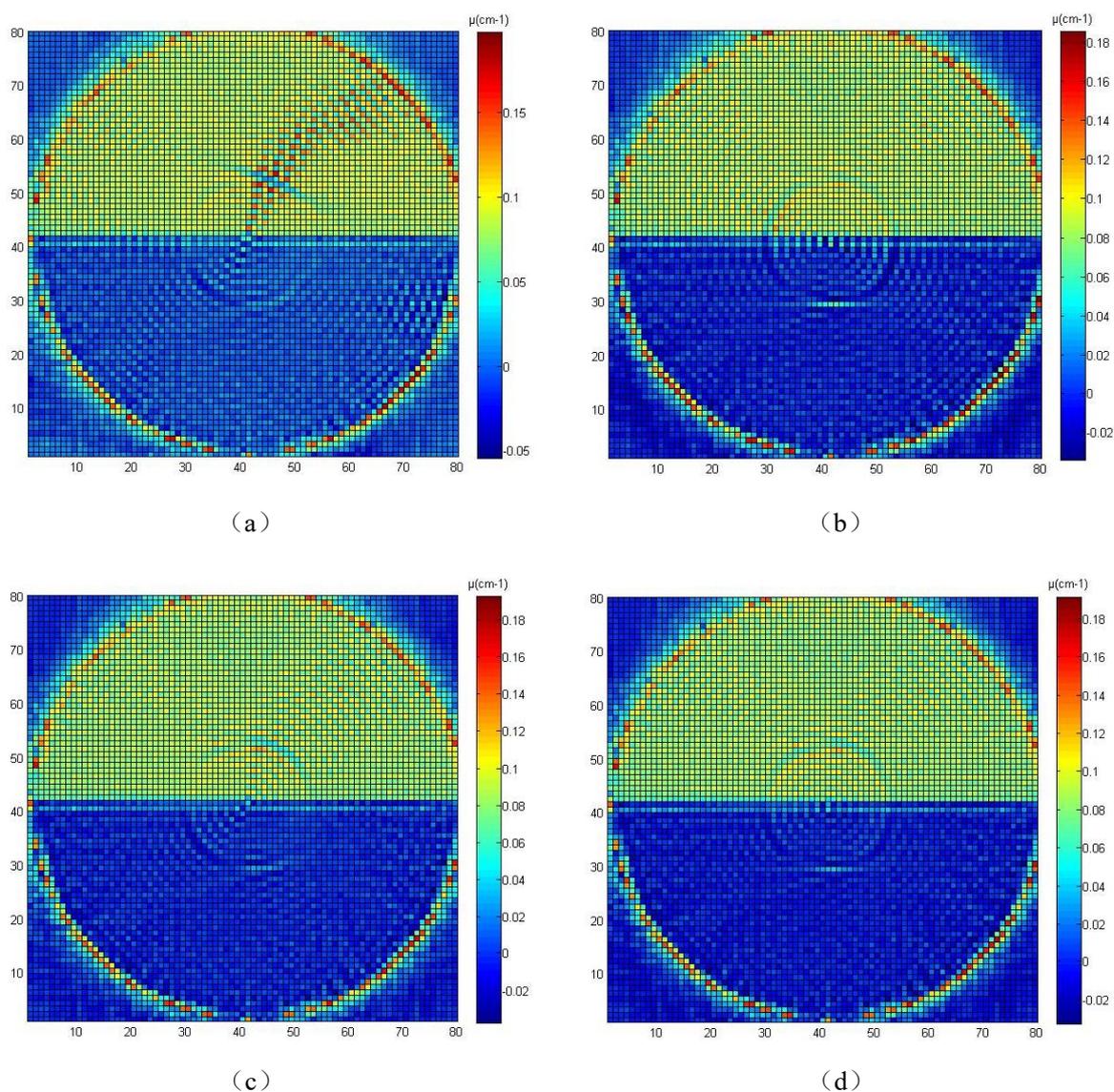


图 4.1 重建图像（分别迭代 10 次、50 次、100 次、500 次）

图中管内黄色部分和蓝色区域分别代表水部分和空气部分，圆周红色部分则代表铝制管所在区域，管外部分同样代表空气。同时可以明显看出，随着迭代次数的增加，被测物场重建图像中对汽水混合物的分辨也更加清晰。但是当迭代次数到达 100 以后，重建图像的质量就没有很明显的提升。

总之，根据以上重建图像可以较为容易地判断出管内轴向流动截面汽水分布的情况，已经能够达到辅助核电站工作人员对管道内气液两相流的流型判断的要求，这也验证了本套汽水混合物伽马成像系统的可行性。

4.1.2 截面含气率

截面含气率也称为空泡份额，是指两相流通过某一截面上，气相所占截面与总流道截面之比，其表达式为

$$\alpha = \frac{A''}{A' + A''} \quad (4-1)$$

式中， A'' 、 A' 、 A 分别代表气相、液相以及总流道截面的流道截面积。

通过对重建结果的分析，求出像素值与水的线衰减系数值相等的管内像素单元数目作为液相的流道截面积，结合流道截面内所有的像素单元数目，就可以求出不同迭代次数计算所得的截面含气率，详见下表 4.1。

表 4.1 不同迭代次数得到的截面含气率

迭代计算的次数	10	50	100	500	理论值
流道截面内像素单元数目	4905	4905	4905	4905	4905
流道截面内液相像素单元数目	2764	2841	2807	2814	2413
流道截面内气相像素单元数目	2141	2064	2098	2091	2492
所得的截面含气率	0.4365	0.4208	0.4277	0.4263	0.5081

由表格数据可以看到，通过多次迭代，截面含气率的数值并没有很大的波动，虽然与理论计算值相比依然存在着差距，但是大致反映出的截面情况仍可供工作人员加以参考。

4.2 重建图像质量评价

4.2.1 定性评价

对于图像质量的评价标准可以分为定性评价和定量评价两类。一般来说，最常用且

最直接的图像评价方法就是我们通过视觉对重建的 CT 图像进行定性评判。本文中对重建图像质量的定性评价包括观察分析图像中统计误差、伪影等。

(1) 统计误差

因为放射源衰变以及射线与物质间的相互作用都是具有统计性的,这使得即使是在完全相同的情况测量环境下,探测器所得到的计数值同样也具有统计性,便产生了系统误差。同时统计误差的产生是源于放射性核素自身衰变的涨落特性,与外界的环境以及测量条件是无关系的,因此也是无法避免的。但是为了尽可能降低统计误差对成像结果的影响,本文在设置放射源参数时,将发射粒子数设置为 20000000,这样使得探测器也可以获得相对较大的计数值,从而减小相对误差以保证重建图像质量。

(2) 伪影

伪影 (Artifacts) 是指被扫描物体本身并不存在而在图像上却出现的各种形态的影像^[30]。由于本套伽玛射线成像系统结构较为简单,很容易出现伪影。通过对上图 4.1 重建结果的观察,会很明显的发现条状伪迹、环状伪迹以及部分容积效应的出现。条状伪迹主要出现在高密度物质附近,这主要是由于射线束不足探测器采样稀疏以及算法对射线投影的处理方式导致的,可以通过增加采样数据的方法进行消除。环状伪影产生的原因主要是通道数据差异,每个射线投影被反投影形成一条直线,在整个采集中持续存在误差产生一组到旋转中心距离固定的直线,直线尾部被抵消而形成环。图中厚度为 5mm 的铝制管成像较为模糊的现象就被称为部分容积效应,主要是因为管道处于气液两相两种不同密度介质之间,其像素边界值被平均而导致的边界信息丢失。

虽然定性评价较为直观地反映出图像带给人们的视觉感知,但是这种方法受不同人的识图能力、专业水平等很多因素的影响,进而导致对同一张图像的评价差异较大,不具有参考价值。因此,为了克服定性评价的这些弊端,我们必须引入新的参量对重建图像进行定量分析。

4.2.2 定量评价

定量评价是指通过计算重建图像与原始图像之间的误差参数以便衡量重建图像质量的一种重要方法。这里主要选用了以下几个参量进行图像评估^{[31][32]}。

(1) 归一化均方距离 (NMSD, Normalized Mean Square Distance)

$$NMSD = \left[\frac{\sum_{i=1}^M (\hat{f}_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^M (f_i - m_f)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4-2)$$

上式中, f_i 代表原始图像中的第 i 个像素的灰度值,而 \hat{f}_i 代表重建图像中的第 i 个像素

的灰度值； m_f 代表原始图像中所有像素灰度值的均值；其中 M 代表图像中像素的个数。

归一化均方距离这一参数能够较为敏感反映出许多像素点均有微小误差的情况，其数值越小，代表重建图像中大多数像素单元与原始图像中对应的像素单元的像素值差距越小。

(2) 归一化平均绝对距离 (NAAD, Normal Average Absolute Distance)

$$NAAD = \frac{\sum_{i=1}^M |\hat{f}_i - f_i|}{\sum_{i=1}^M |f_i|} \quad (4-3)$$

上式中所涉及到的物理参数含义与式 (4-2) 中对应的物理参数含义相同。

归一化平均绝对距离能够敏感地反映出某几像素点出现较大误差的情况，其数值越小，代表重建图像中某些像素单元与原始图像中对应的像素单元的像素值差距越小。

(3) 信噪比 (SNR, Signal Noise Rate)

$$SNR = 10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^M (\hat{f}_i - m_{\hat{f}})^2}{\sum_{i=1}^M (f_i - f_i)^2} \right) \quad (4-4)$$

式中， $m_{\hat{f}}$ 代表重建图像中所有像素灰度值的均值，其他所涉及到的物理参数含义与式 (4-2) 中对应的物理参数含义相同。

信噪比能够反映重建图像的噪声情况，数值越大，意味着重建图像的质量越高。

(4) 图像相关系数 (CORR, Correlation Coefficient)

$$CORR = \frac{\sum_{i=1}^M (f_i - m_f)(\hat{f}_i - m_{\hat{f}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (f_i - m_f)^2 \sum_{i=1}^M (\hat{f}_i - m_{\hat{f}})^2}} \quad (4-5)$$

上式中所涉及到的物理参数含义与式 (4-4) 中对应的物理参数含义相同。

图像相关系数是用于评价重建图像与原始图像的相似度，其数值越大，意味着与原始图像的相关性越强，重建图像的质量越高。

表 4.2 不同迭代次数重建图像评价参数表

迭代计算的次数	10	50	100	500
归一化均方距离	0.3121	0.3036	0.3010	0.2991
归一化平均绝对距离	0.4023	0.3862	0.3733	0.3691
信噪比	6.7178	6.5099	6.4104	6.4657
图像相关系数	0.8310	0.83803	0.8403	0.8416

根据上述图像评价参数的定义,通过对重建图像数据的计算,求出了迭代次数为 10、50、100、500 时的各个参数具体值,详见上表 4.2。

下图 4.2 清晰地展示了图像评价参数随迭代计算次数 N 的变化情况。随着迭代次数 N 的增加,归一化均方距离和归一化平均绝对距离具有相同的变化趋势——从陡降过渡到缓慢降低的过程,这反映了所得到的重建图像中许多像素点均有微小误差、某几像素点出现较大误差的情况具有较为可观的改善。同时,图像相关系数一直保持在 0.83 以上,并出现了不断增加的趋势,这也同样说明重建图像质量随着迭代次数的增加有了很显著的提高。但信噪比的变化情况却与预计的并不相符,这可能是由于随着重建图像质量的提高,部分像素单元内像素值的数量级有所变动导致信噪比出现微小的异常波动。

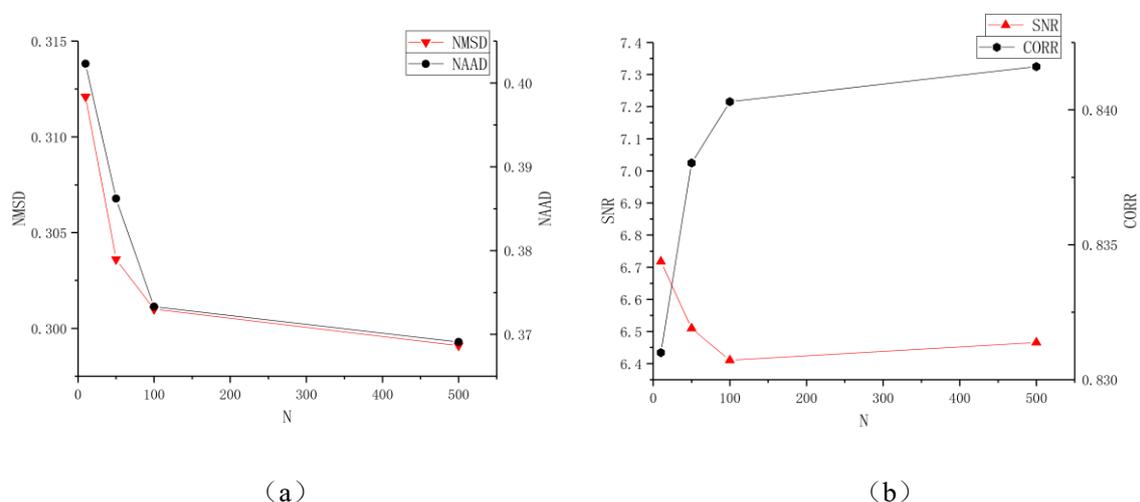


图 4.2 重建图像评价参数随迭代计算次数变化曲线图

综上所述,随着迭代计算次数的增加,上文所涉及到的图像评价参数变化规律基本符合预期,被测物场重建图像的质量也得到了较为明显的提高。

4.3 本章小结

本章主要对重建结果进行了分析与评价。经过不同的迭代次数的计算,重建图像对物质组成显现地更加清晰,计算所得到的截面含气率也基本符合要求。随后通过使用主观性评价方法,从统计误差和伪影产生两方面对图像效果进行了评价。同时,本章选用一些被认可的图像评价参数标准对重建所得的图像进行量化评价,更具有说服力。通过多角度的分析与评价,验证了本套成像系统的可行性。

结 论

本课题是基于伽马射线的汽水混合物成像模拟，其属于验证型的设计研究。本文首先对国内外用于汽水混合物测量的伽马成像系统设备以及图像重建算法进行了相关的调研，了解到当前伽马射线成像系统发展较为迅速，已经从单源系统发展至多源系统，同时成像算法也趋于成熟。因此，基于这一研究现状，本文主要是参考这些论文中一种较为成熟的成像系统——第三代扇形束伽马成像系统作为设计原型，结合核电厂管道内汽水混合物测量的特殊性，设计了一套适合核电厂环境测量的伽马成像系统模型。

本文中设计的伽马成像系统模型主要具有以下特点：

1.选择能量为 662keV、活度为 100mCi 的 ^{137}Cs 点源作为放射源部分。这种设计是基于核电厂管道尺寸以及管内气液两相流常见流态所决定的，同时为了获得较为清晰的管道截面内部物质分布图，选用 ^{137}Cs 点源是最合适的。

2.选择 NaI 闪烁体探测器阵列作为探测部件。出于对探测器计数率、能量分辨率以及稳定性等方面的综合考虑，由于 γ 射线与 NaI 相互作用的三种机制截面较大，并且可以制成大体积状，所以对 γ 射线的探测效率和能量分辨率表现都较好。

3.选择一个具有多孔的铅制弧形后准直器用于射线的准直。由于放射源发出射线所形成的 40° 张角内对应的探测器单元数目较少，为了获得大量的投影数据，利用设计的后准直器，就可以通过旋转后准直器来获得成像所需的投影数据量。

基于上述系统设计方案，本文使用一种用于模拟射线粒子与物质相互作用的通用蒙特卡罗仿真软件工具包 Geant4，将管径为 40cm 的被测管道内设置为气液两相流中常见的分层流。考虑核电厂复杂的测量环境，设置了系统的扫描方式，最后获得多组投影数据。为了通过不完整的投影数据获得重建图像，本文选用了代数迭代算法对投影数据进行处理，获得了不同迭代次数的重建图像。随后，借助一套图像质量评价方法对所得图像进行了多方面评价，并对统计误差与伪影问题进行了分析，最终验证了本文设计的伽马成像系统的可行性。

本文完成了搭建并验证常见伽马成像系统的任务，但未考虑多能 γ 射线、探测器数目、算法精度等因素对重建图像的影响。在今后的工作中，可以对这些参数进行优化相关的研究，并提高该系统的时间分辨率以适用于高速气液两相流的测量与成像。

参考文献

- [1] 阎昌琪.气液两相流(第三版)[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2017.
- [2] HUANG Zhiyao, JIN Ningde, LI Haiqing. Application of computerized tomography to measurement of multiphase flow [J]. Chemical Reaction Engineering and Technology,1996, 12(4): 395-404.
- [3] De Vuono AC, Schlosser P A, Kulacki F A, et al. Design of an Isotopic CT Scanner for Two Phase Flow Measurements[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1980, 27(1):814-820.
- [4] Kumar S B, Moslemian D, Dudukovi M P. A γ -ray tomographic scanner for imaging voidage distribution in two-phase flow systems[J]. Flow Measurement & Instrumentation, 1995, 6(1):61-73.
- [5] Hori K, Fujimoto T, Kawanishi K, et al. Development of an Ultra-fast X-ray Computed Tomography Scanner System. Application for Measurement of Instantaneous Void Distribution of Gas-Liquid Two-Phase Flow[J]. Heat Transfer-Asian Research, 1998, 29(3):155-165.
- [6] Hampel U, Bieberle A, Hoppe D, et al. High resolution gamma ray tomography scanner for flow measurement and non-destructive testing applications[J]. Review of Scientific Instruments, 2007, 78(10):158.
- [7] Heindel T J, Gray J N, Jensen T C. An X-ray system for visualizing fluid flows[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2008, 19(2):67-78.
- [8] Hjertaker B T, Maad R, Schuster E, et al. A data acquisition and control system for high-speed gamma-ray tomography[J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19(9):094012.
- [9] 戴鹏.多相流 CT 系统仿真优化与重建算法[D].天津大学,2008.
- [10] 薛倩.多相流 CT 系统成像算法研究及软件设计[D].天津大学,2010.
- [11] Kak A C, Slaney M. Principles of computerized tomographic imaging [M]. IEEE Press,1999:49-92.
- [12] Herman G T. Fundamentals of computerized tomography: image reconstruction from projections [M]. Springer,2009:1 -26.
- [13] 庄天戈.CT 原理与算法[M].上海.上海交通科技大学出版社,1993.
- [14] 徐洪增.多层螺旋 CT 图像重建与噪声分析[D].山东大学,2006.
- [15] 王革,俞恒永,勃鲁努·德·曼.X 线 CT 研究与发展之展望[J].中国医疗器械杂志,2008(3):157-169.
- [16] Herman G T. Image reconstruction from projections[J]. Real-Time Imaging,1995,1(1):

3-18.

- [17] Herman G T, Lent A, Rowland S W. ART: mathematics and applications: a report on the mathematical foundations and on the applicability to real data of the algebraic reconstruction techniques[J]. Journal of Theoretical Biology,1973,42(1): 1-32.
- [18] 卢希庭.原子核物理[M].原子能出版社:北京,2000:63-68.
- [19] 王汝贍,卓韵裳.核辐射测量与防护[M].原子能出版社,1990:78-82.
- [20] 俞恒永,牟轩沁,王勇, et al.布尔雷唐变换及其性质的研究[J].西安交通大学学报,2001.
- [21] 王琦.多相流 CT 系统成像算法研究[D].天津大学.
- [22] Medeiros L F D , Silva H P D , Ribeiro E P . Tomographic Image Reconstruction of Fan-Beam Projections with Equidistant Detectors using Partially Connected Neural Networks[J]. 2003.
- [23] 张聪哲,李晓苇,杨昆.扇束等角型 CT 与等距型 CT 的比较研究[J].CT 理论与应用研究,2013,22(02):215-223.
- [24] 张顺利,张定华,熬波,黄魁东.不完全投影数据图像重建的 ART 算法研究[J].计算机工程与应用,2007(10):8-10.
- [25] 裴鹿成.蒙特卡罗方法及其在粒子输运问题中的应用[M].科学出版社,1980:23-25.
- [26] Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. GEANT4-a simulation toolkit[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2003, 506(3):250.
- [27] Guatelli S, Cutajar D, Oborn B, et al. Introduction to the Geant4 Simulation toolkit[C] American Institute of Physics, 2011.
- [28] 陈伯显,张智.核辐射物理及探测学[M].哈尔滨工程大学出版社:哈尔滨,2011:281-282.
- [29] 辛山.基于 γ 射线 CT 及 ECT 的气液两相流成像系统[D].天津大学,2011.
- [30] 杨克桢,王余锋.CT 图像伪影[J].医疗装备,2006,19(5):16-17.
- [31] Rust G F, Aurich V, Reiser M. Noise/dose reduction and image improvements in screening virtual colonoscopy with tube currents of 20 mAs with nonlinear Gaussian filter chains[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2002, 4683:186-197.
- [32] Hanson K M. Reduction of noise and image artifacts in computed tomography by nonlinear filtration of projection images[J]. Proc Spie, 2001, 4322.

致 谢

光阴荏苒，岁月如梭，本科四年很快就要告一段落。回顾自己在哈工程这四年的大学时光，成功过也失败过，欢笑过也痛苦过。从刚入学时的懵懂无知，到如今对未来人生的清晰规划，在老师、同学的陪伴下，自己成长了很多、收获了很多。回想起这些年的点点滴滴，依然会感到无尽的怀念与不舍。

衷心的感谢宋玉收老师，从始至终宋老师给我提供了悉心的指导与帮助。大四上学期老师就开始引导我阅读 CT 成像相关的论文，并为我完成毕业设计合理规划了时间。每次汇报工作进展时，宋老师都会认真聆听，肯定自己工作的同时也会向我提出建设性意见，并明确接下来的工作任务。宋老师是一位积极进取、为人随和的科研学者，他对待学术问题那种一丝不苟的科研精神以及认真负责的工作态度一直影响着我。在接下来的研究生学习生活中，自己一定会以宋老师为榜样继续努力学习工作。

衷心的感谢刘辉兰老师，了解到我未来研究生时的研究方向后，建议我到核技术组完成毕业设计，并为我提供学习的场所——核电子学实验室 265 室。在整个毕业设计的过程中，刘老师像母亲关心我，在我获得荣誉时为我祝贺，在我气馁无助时给予安慰。

感谢谢肇阳师兄，尽管谢师兄任务繁重，但是当我在进行毕业设计过程中，他给予了我极大的指导与帮助。谢师兄对我不仅仅是科研工作上的榜样，同时他对生活的那份热爱也让我对自己的学习生活有了新的理解。

感谢我的同级邱涛、鄢达同学在软件使用和程序编写方面的帮助。在我初入 377 室时，是他们的热情让我更快地适应安心科研应用的状态；每当我遇到问题时，他们总是第一时间为我答疑解惑。你们的帮助让我体验到了科研独特的乐趣。

感谢寝室的室友们，是你们让我在寝室有了家的感觉。与你们相处的日子里，我学会了也很多也成长了很多。愿你们前途似锦！

感谢母校四年的培养，感谢学院各级领导与老师的关怀，让我度过了人生中最重要的大学生四年，愿我最亲爱的母校桃李满天下。

最后，我想特别感谢我的家人，远在家乡的他们时刻都在关心支持着我，他们的理解和鼓励是我一直奋发向前的动力。

再一次向老师、师兄、同学和家人表示最真挚的谢意，祝你们永远健康快乐！

我将永远铭记所有的帮助与关怀。在未来的生活中，我定会继续拼搏奋斗，用成绩回报所有。