

汽水混合物伽马成像模拟

——毕业论文答辩



答辩学生：王世磊



指导教师：宋玉收



哈爾濱工程大學

HARBIN ENGINEERING UNIVERSITY

目录



研究背景意义



成像系统设计



工作
总结展望



技术理论基础



结果分析评价



哈尔滨工程大学

HARBIN ENGINEERING UNIVERSITY



1.1 背景及意义

“

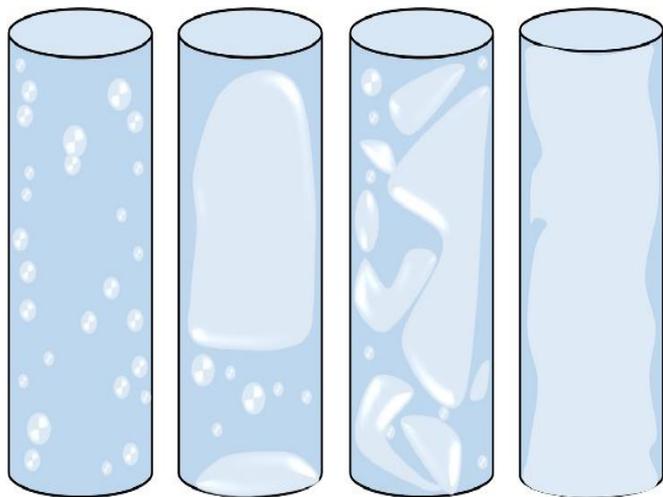


图1.1 竖直管道中汽水混合物四种常见流态

汽水混合物

又称气液两相流，广泛存在于工业生产等领域。尤其在核电站，及时准确测量管道内流体的截面含气率、流型等参数，具有重要意义。



气泡堆叠



成本昂贵



非侵入性

研究背景意义)

技术理论基础

成像系统设计

结果分析评价

工作总结展望



1.2.1 汽水混合物CT成像研究现状

“

- ◆ 1976年 美国 单能 γ 射线测量气液两相流截面分布
- ◆ 1980年 美国 设计第四代新型多相流成像装置
- ◆ 1995年 美国 研发检测截面含气率的 γ 成像系统
- ◆ 1998年 日本 研制超高速X射线计算机断层扫描仪
- ◆ 2007年 德国 研制出解析度为2mm的新型 γ 扫描仪
- ◆ 2008年 挪威 构建一套实时的 γ 射线成像系统
- ◆ **2008年 中国 设计分辨率为7.1mm的多源成像系统**

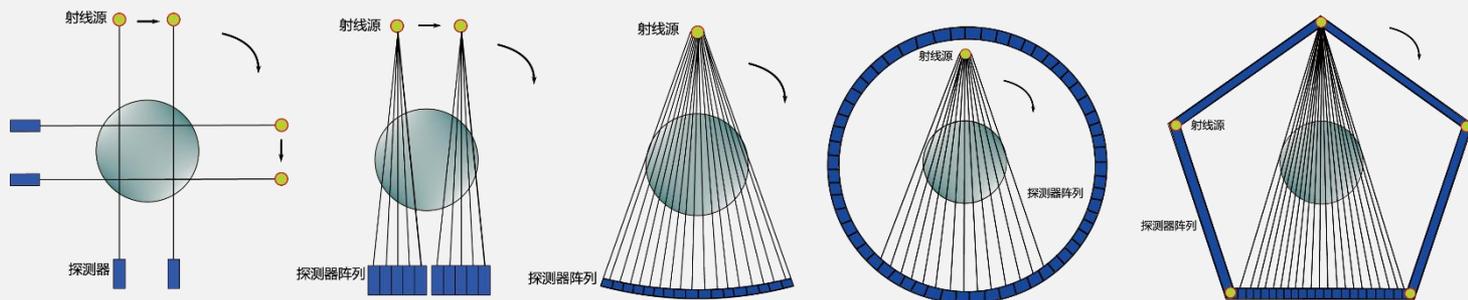


图1.2 工业CT发展历程

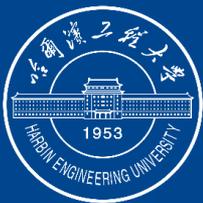
研究背景意义)

技术理论基础

成像系统设计

结果分析评价

工作总结展望



1.2.2 图像重建算法研究现状



利用射线衰减的性质反推出被测物体内的物质分布情况，这个通过投影将图像重建的过程就被称为**CT重建**。

研究背景意义)

技术理论基础

成像系统设计

结果分析评价

工作总结展望

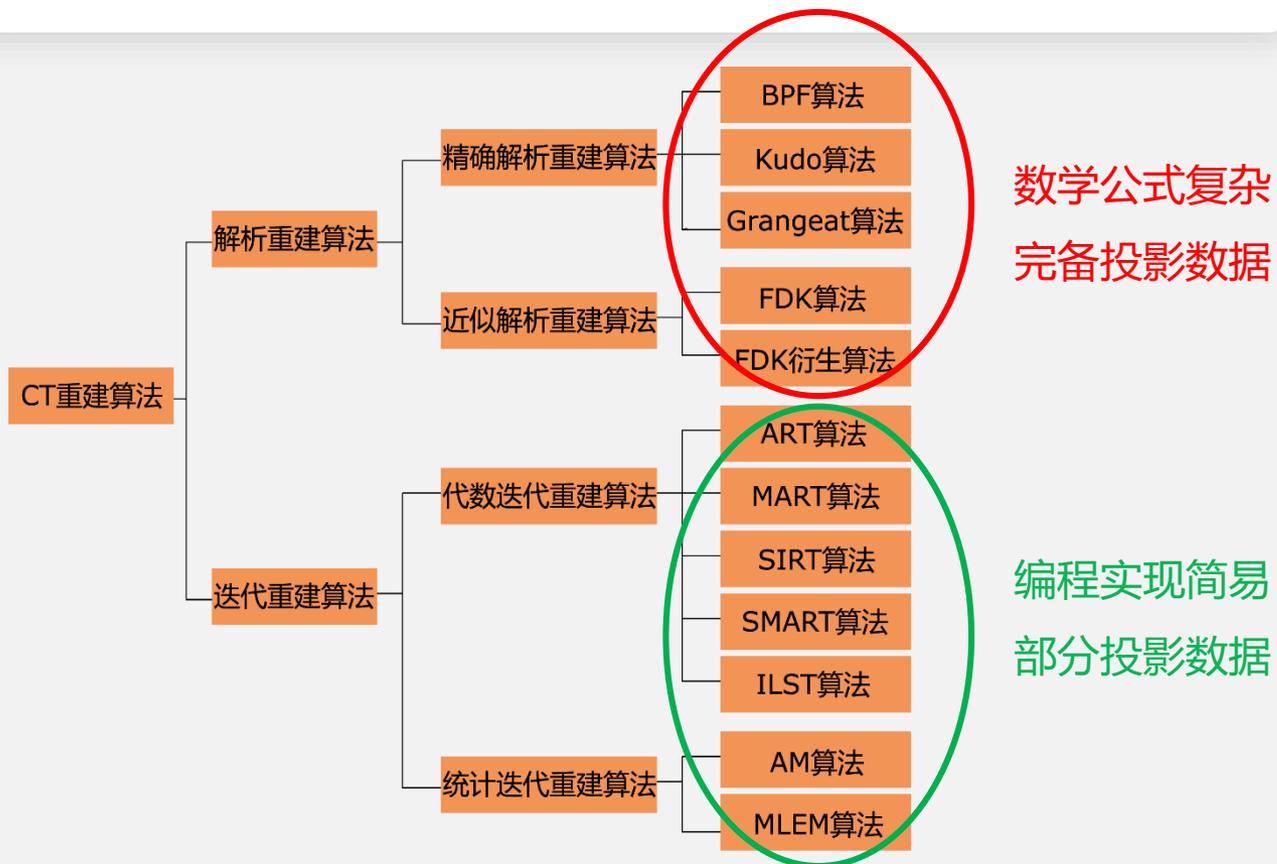


图1.3 CT重建算法分类



2.1 线衰减系数

“

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，其表达式为

$$\frac{\Delta I}{I} = -\mu\Delta x$$

$$\mu_m = \mu/\rho$$

$$\mu_m = \alpha_1\mu_{m1} + \alpha_2\mu_{m2} + \alpha_3\mu_{m3} + \dots$$

表2.1 常用的物质衰减系数 (光子能量为662keV)

物质	线性吸收系数 (1/cm)	密度 (g/cm ³)	质量吸收系数 (cm ³ /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

研究背景意义

技术理论基础)

成像系统设计

结果分析评价

工作总结展望



2.2.1 射线投影基础

“

线衰减规律

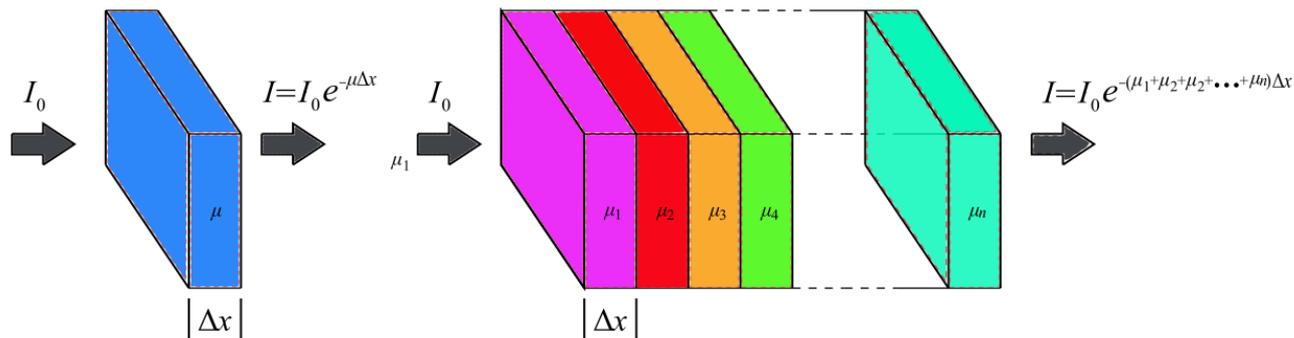


图2.1 均匀和非均匀物体对单能 γ 射线的衰减作用示意图

◆ 通过均匀物质

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot \Delta x}$$

◆ 通过非均匀物质

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-\mu_1 \cdot \Delta x}$$

$$\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n = -\frac{1}{x} \ln \frac{I_n}{I_0}$$

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

$$x \sum_{i=1}^n \mu_i = -\frac{1}{x} \ln \frac{I_n}{I_0}$$

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

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

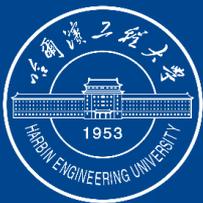
研究背景意义

技术理论基础)

成像系统设计

结果分析评价

工作总结展望



2.2.2 Radon变换及逆变换

“

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。

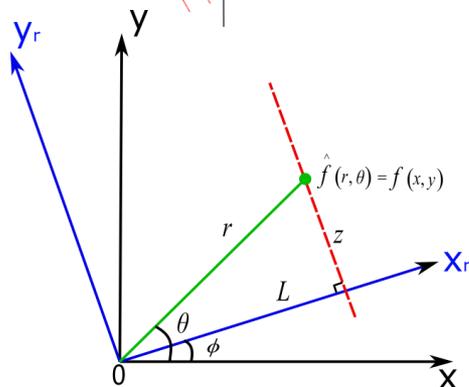
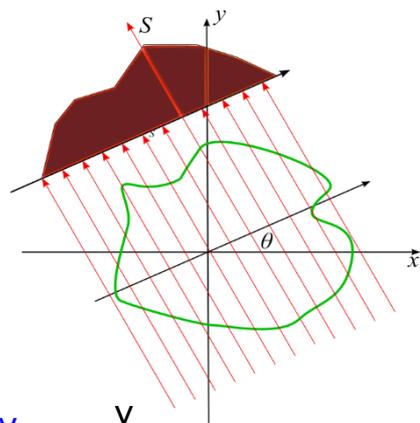


图2.2 Radon变换坐标系

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



$$\begin{aligned}
 \hat{f}(r, \theta) &= \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\pi \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{r \cos(\theta - \phi) - l} \frac{\partial P}{\partial l} dl d\phi \\
 P_\theta(t) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - t) dx dy
 \end{aligned}$$

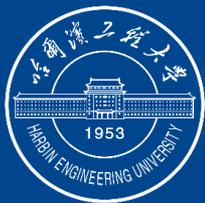
研究背景意义

技术理论基础

成像系统设计

结果分析评价

工作总结展望

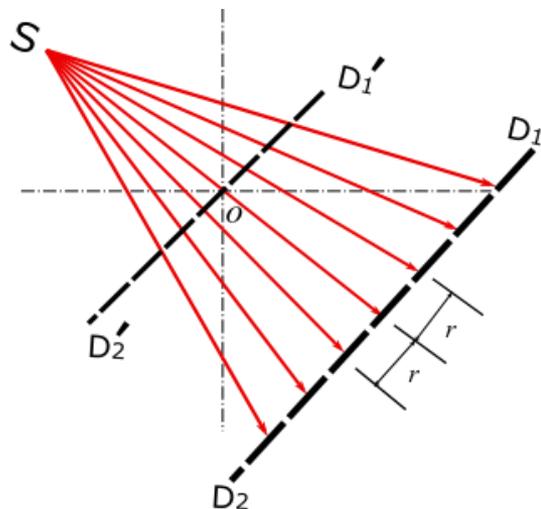


2.3.1 扇形束图像重建算法

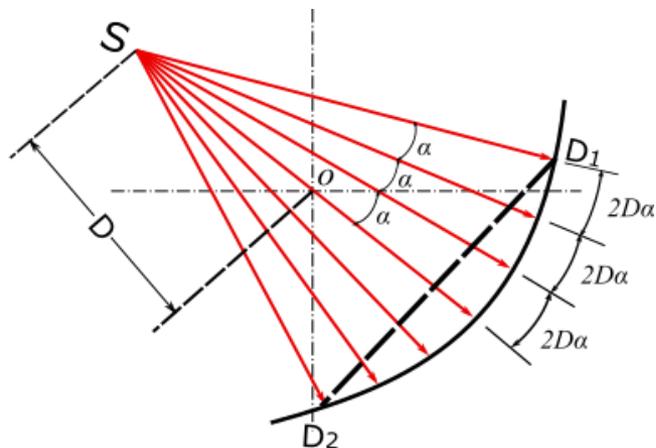
“

根据对投影数据处理方式，可以分为以下两类：

- 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**：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。



(a) 等间距射线型



(a) 等角度射线型

图2.3 扇形束投影的两种形式

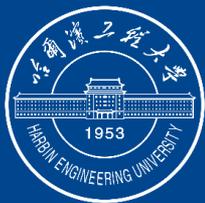
研究背景意义

技术理论基础

成像系统设计

结果分析评价

工作总结展望

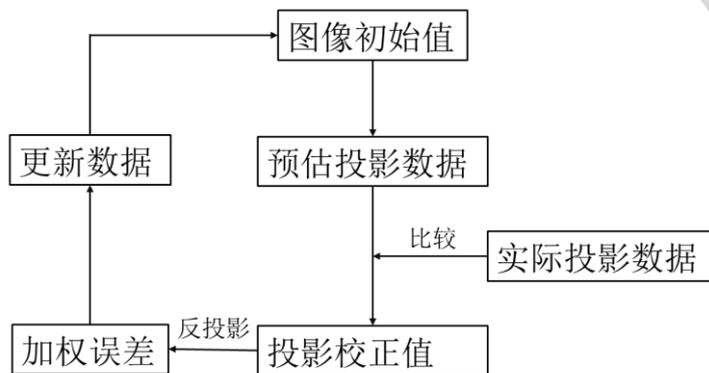


2.3.2 代数迭代算法

“

算法基本思想

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，**不断重复进行“比较-修正”。**



$$P_{ij} = r_{ij}x_j$$

$$P_i = \sum_j P_{ij} = \sum_j r_{ij}x_j$$

$$P = RX$$

$$P = [p_1, p_2, \dots, p_m]^T$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

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

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$$

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

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

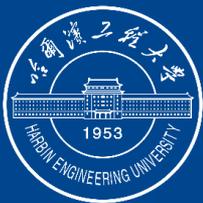
研究背景意义

技术理论基础

成像系统设计

结果分析评价

工作总结展望



3.1 Geant4仿真工具包

“ 简要介绍

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。

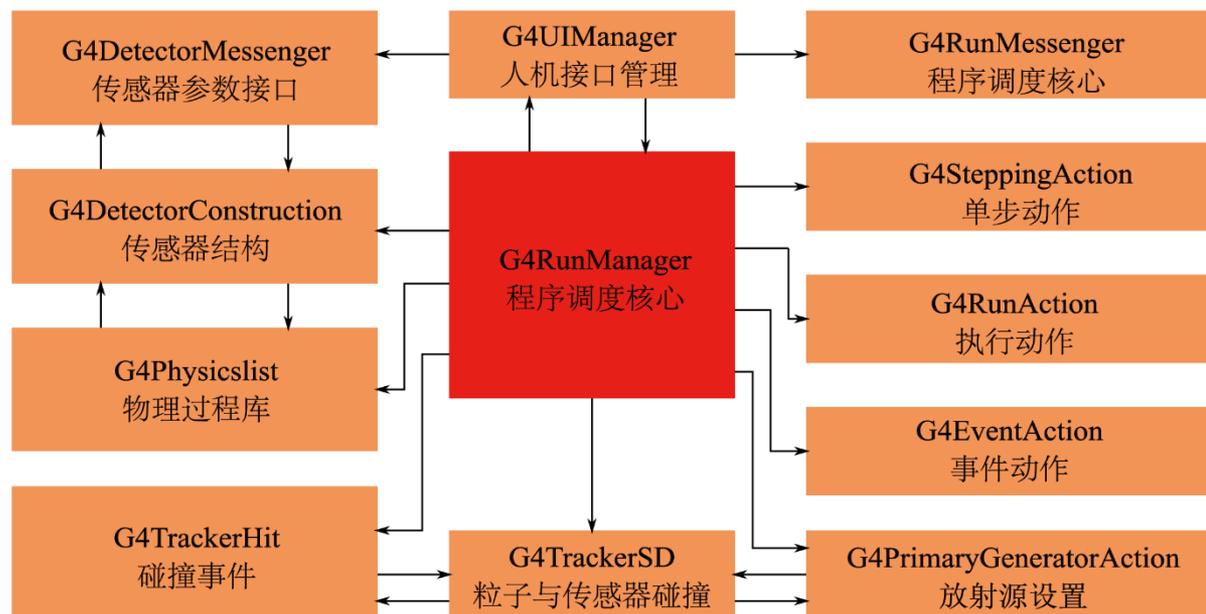


图3.1 Geant4程序模块结构图

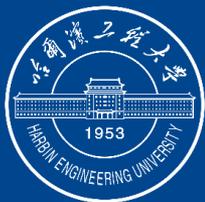
研究背景意义

技术理论基础

成像系统设计)

结果分析评价

工作总结展望



3.2.1 系统模型设计

“

(1) 放射源的选择

选用一个封装的活度为100mCi的 ^{137}Cs 点源。

表3.1 常用 γ 射线源的性质

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

(2) 探测器的选择

- ① 计数效率尽可能高;
- ② 能量分辨率尽量高;
- ③ 闪烁体稳定性较强。

选用**NaI闪烁体探测器圆弧阵列**作为探测部件。

研究背景意义

技术理论基础

成像系统设计

结果分析评价

工作总结展望



3.2.1 系统模型设计

“

(3) 放射源-被测物场-探测器距离的确定

具体距离的确定需要以**被测物场的尺寸**为依据。

(4) 准直器的设计

前准直器：将放射源发出的射线**整形**为厚度较小的扇形束；

后准直器：将因发生散射而偏离原有轨道的射线粒子**过滤**。

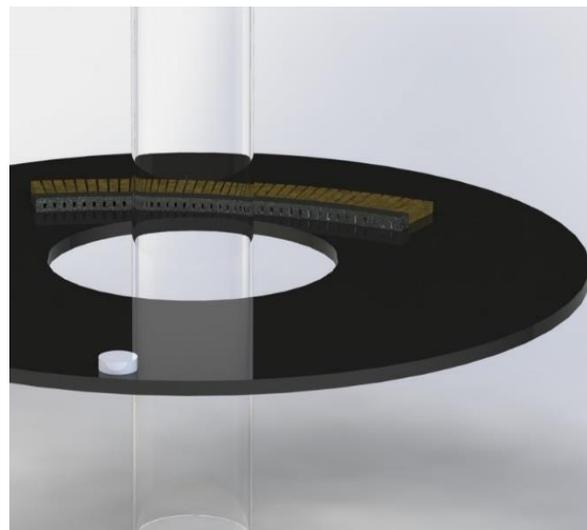
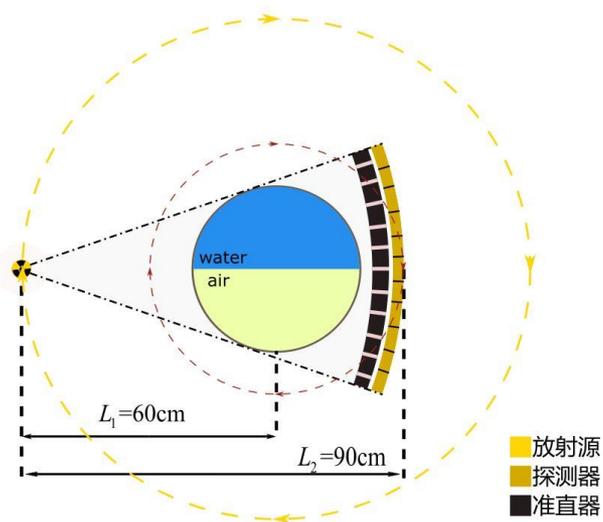


图3.2 汽水混合物伽马成像系统装置模型图

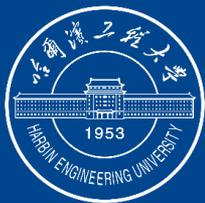
研究背景意义

技术理论基础

成像系统设计

结果分析评价

工作总结展望



3.2.2 Geant4建模过程

“

具体文件内容编写

1、 **B1DetectorConstruction.cc**:

直径为40cm、壁厚为5mm的铝制管，管长40cm，分层流。

2、 **B1PrimaryGeneratorAction.cc**:

能量为662KeV、活度为100mCi的 ^{137}Cs 点源。粒子发射的水平张角为 40° ，竖直张角为 2° 。

3、 **B1Stepping.cc**:

探测到的有效粒子满足两个条件:

- ◆必须是放射源发出的 γ 光子，否则粒子计数无效;
- ◆接收到的粒子必须是第一次到达探测器就被探测到。

4、 **B1Event.cc**、 **B1RunAction.cc**、 **B1Stepping.cc**:

输出所需要的包括 EventID、 StepID、 PreStepPoint、 DetectorName、 ParticleName、 Counter在内的探测器计数数据。

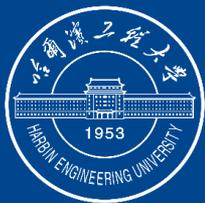
研究背景意义

技术理论基础

成像系统设计)

结果分析评价

工作总结展望



3.3 仿真数据获取与处理

“

1、划分被测物场

对于任意一组投影， γ 射线通过管道发生的强度衰减情况如下：

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu_{\text{Aluminium}} \cdot x_{\text{Aluminium}} - \mu_{\text{Water}} \cdot x_{\text{Water}}}$$

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

$$f_{i,k} = \mu_{i,k}$$

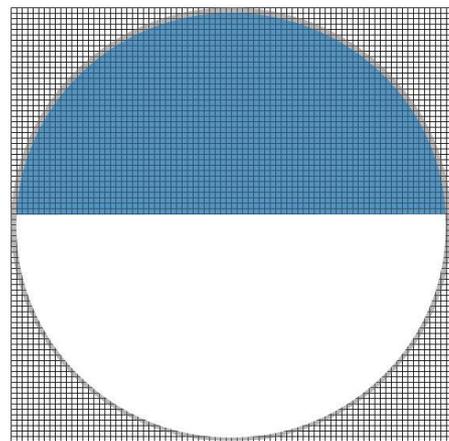


图3.3 80×80网格划分示意图

2、确定扫描方式

- ◆ 选用90个视角对被测物场进行**0°~180°等角度间距**扫描模式。
- ◆ 对于每一个扫描视角，**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。

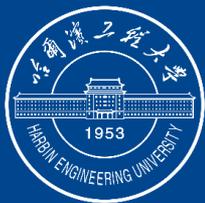
研究背景意义

技术理论基础

成像系统设计)

结果分析评价

工作总结展望



3.3 仿真数据获取与处理



3、设置射线矩阵

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。

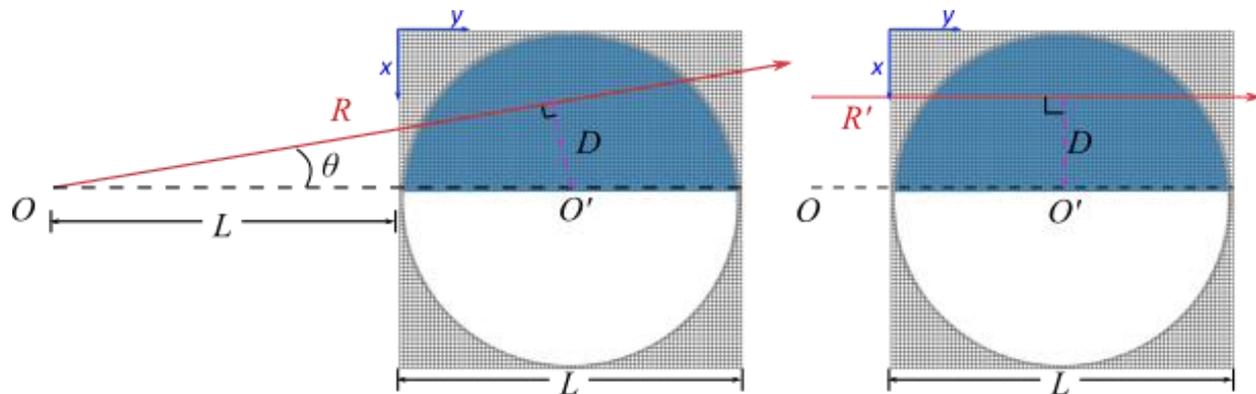
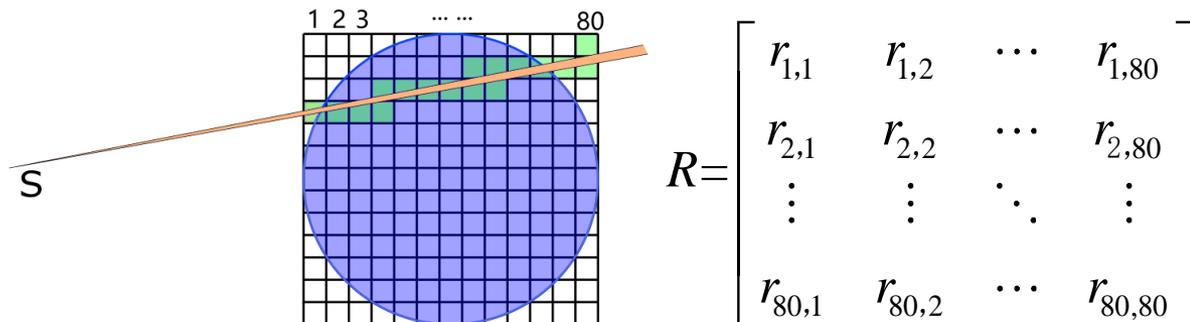


图3.4 射线方程求解示意图

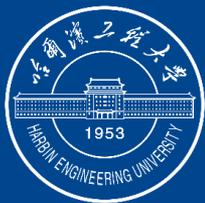
研究背景意义

技术理论基础

成像系统设计

结果分析评价

工作总结展望



3.3 仿真数据获取与处理

“

4、建立方程组

每条射线穿过被测物场的投影值等于射线矩阵与被测物场矩阵中对应元素相乘并求和，使用哈达马积 (Hadamard product) 表示为：

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

$$P = \sum_{i=1}^{80} \sum_{j=1}^{80} r_{i,j} \cdot f_{i,j} = \sum_{i=1}^{80} \sum_{j=1}^{80} r_{i,j} \cdot \mu_{i,j}$$

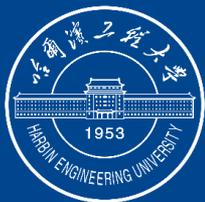
研究背景意义

技术理论基础

成像系统设计)

结果分析评价

工作总结展望



3.3 仿真数据获取与处理



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

$$F_0 = [0.05]_{80 \times 80}$$

(2) 迭代过程

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

$$P_{reality} = \sum_n \mu_{n,reality}$$

$$P_{theory} = \sum_n \mu_{n,theory}$$



$$\mu_{n,new} = \mu_{n,reality} + \left| \frac{P_{reality} - P_{theory}}{n} \right|$$

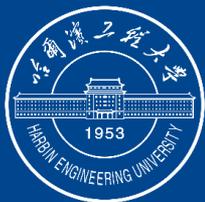
研究背景意义

技术理论基础

成像系统设计)

结果分析评价

工作总结展望



4.1.1 汽水混合物截面物质分布

“

研究背景意义

技术理论基础

成像系统设计

结果分析评价)

工作总结展望

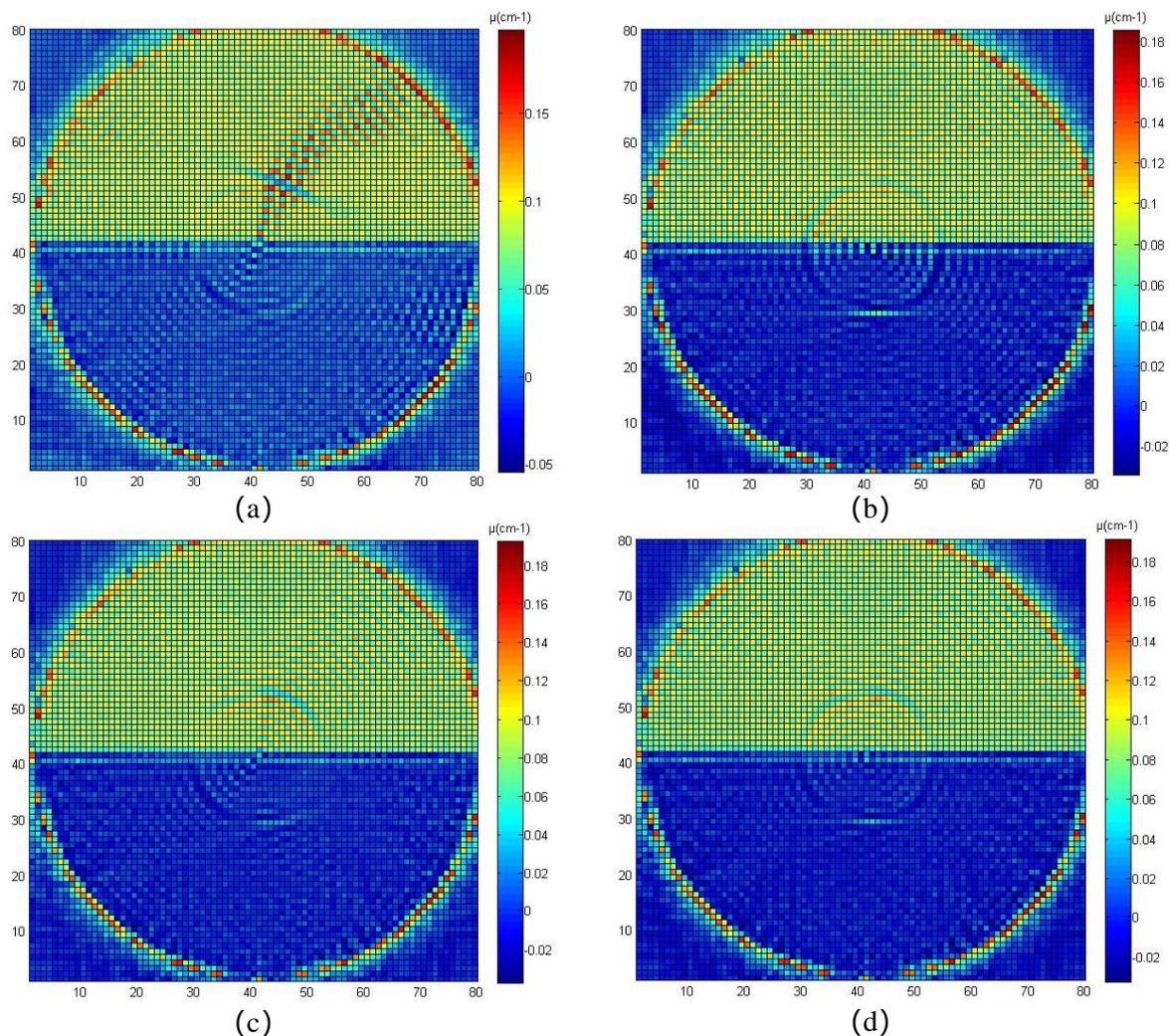
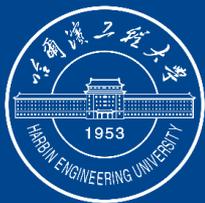


图4.1 重建图像 (分别迭代10次、50次、100次、500次)



4.1.2 截面含气率

“

又称为空泡份额，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：

$$\alpha = \frac{A''}{A} = \frac{A''}{A' + A''}$$

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。

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

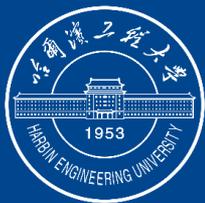
研究背景意义

技术理论基础

成像系统设计

结果分析评价)

工作总结展望



4.2.1 定性评价

“

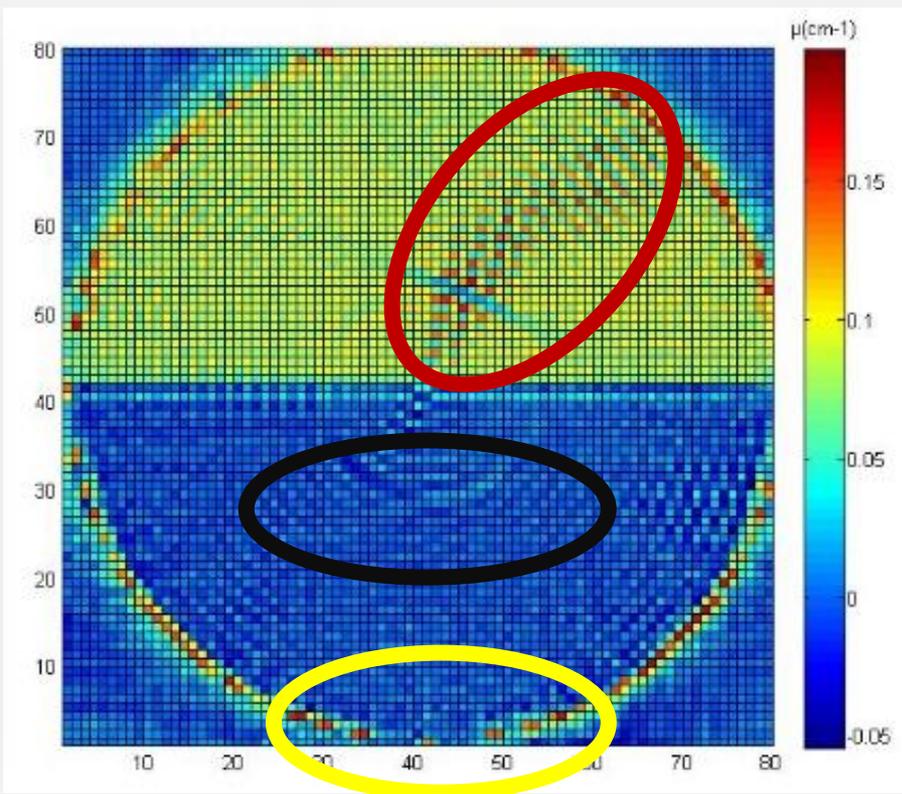
最常用且最直接的图像评价方法就是通过视觉对重建CT图像进行定性评价。

(1) 统计误差

放射性核素自身衰变的涨落特性，与外界的环境和测量条件无关，无法避免。(20000000)

(2) 伪影

- 条状伪迹
- 环状伪迹
- 部分容积效应



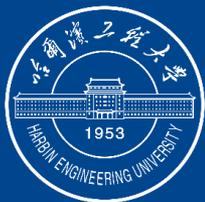
研究背景意义

技术理论基础

成像系统设计

结果分析评价

工作总结展望



4.2.2 定量评价

“ 定量评价参量

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

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

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

$$NAAD = \frac{\sum_{i=1}^M |\hat{f}_i - f_i|}{\sum_{i=1}^M |f_i|}$$

- (3) 信噪比 (SNR, Signal Noise Rate)

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

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

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

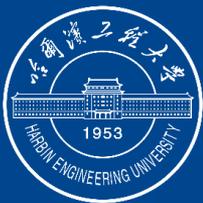
研究背景意义

技术理论基础

成像系统设计

结果分析评价

工作总结展望



4.2.2 定量评价

“

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

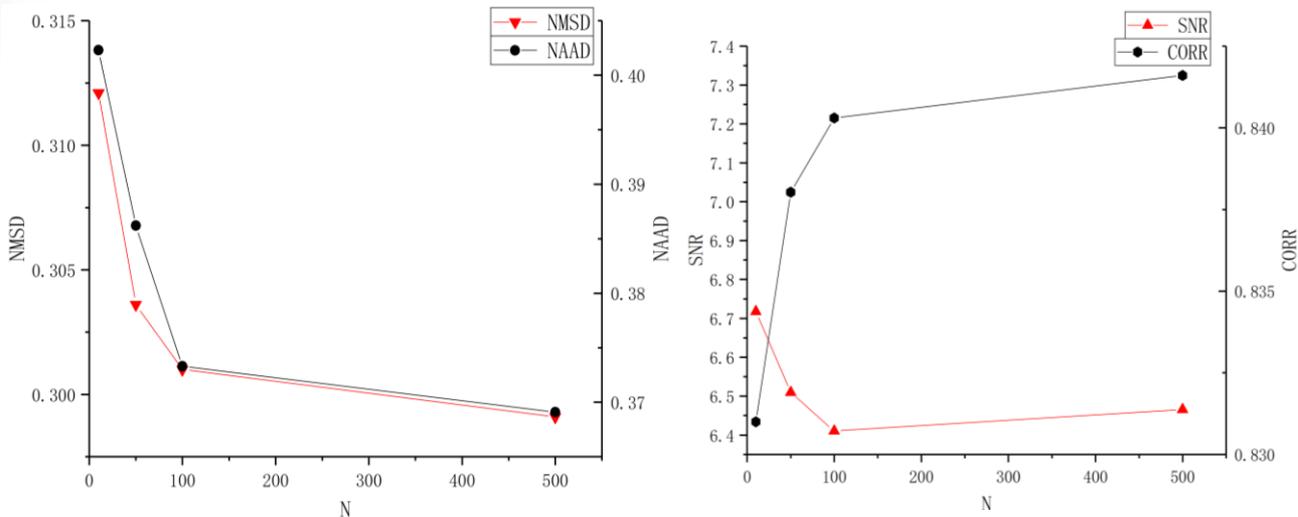


图4.2 重建图像评价参数随迭代计算次数变化曲线图

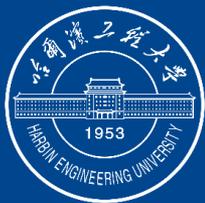
研究背景意义

技术理论基础

成像系统设计

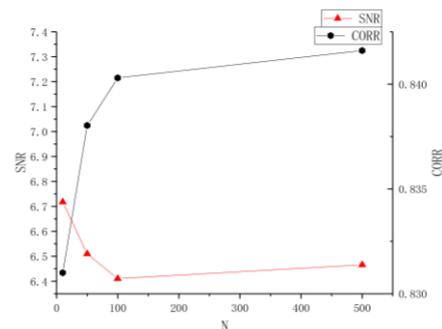
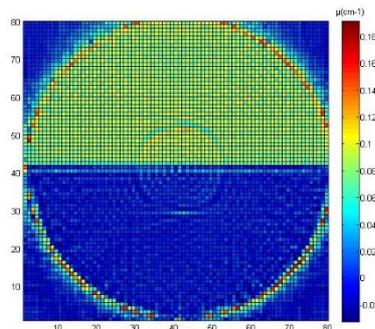
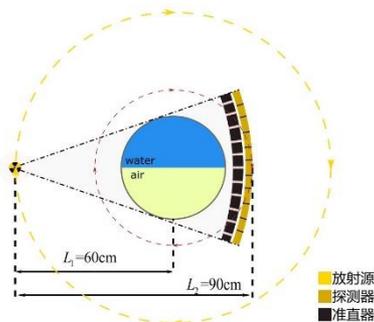
结果分析评价)

工作总结展望



工作总结展望

“工作总结



基于 ^{137}Cs 等角度型扇形束成像系统

总体完成了**系统设计、软件模拟、算法实现、图像重建、多重评价**等任务。

未来展望

- 1、算法精度的评价方法
- 2、源、探测器对成像的影响
- 3、多能 γ 射线成像、三维成像等问题

研究背景意义

技术理论基础

成像系统设计

结果分析评价

工作总结展望

致 谢

感谢母校提供的学习与实践的机会；
感谢核技术课题组， 特别感谢宋老师给予的耐心指导；
感谢师兄及同学的帮助；
感谢答辩评审！



哈尔滨工程大学
HARBIN ENGINEERING UNIVERSITY