

射线成像检测实验指导书

敖波 主编

南昌航空大学

2017.4

目录

实验一 构件射线 CR 成像检测(综合性实验)	1
1 实验目的	1
2 实验原理	1
3 实验步骤	1
4 实验任务	3
X-射线 CR 技术卡(样例)	4
X-射线 CR 技术卡	5
实验二 构件射线 DR 成像检测(综合性实验)	6
1 实验目的	6
2 实验原理	6
3 实验步骤	7
4 实验任务	10
射线 DR 检测工艺卡(参考)	11
射线 DR 检测工艺卡	12
实验三 CT 仿真实验(综合性实验)	13
1 实验目的	13
2 实验原理	13
3 实验步骤	16
4 实验任务	18
实验四 构件工业 CT 成像检测(演示性实验)	19
1 实验目的	19
2 实验原理	19
3 实验步骤	20
4 CT 重建	23
5 实验任务	29

实验一 构件射线 CR 成像检测(综合性实验)

1 实验目的

- (1) 掌握 CR 检测原理及基本操作方法
- (2) 掌握 CR 检测工艺设计方法
- (3) 了解 CR 图像质量评价方法
- (4) 了解 CR 图像处理基本操作

2 实验原理

射线 CR 检测原理如下：(1) 曝光时，射线束穿过工件后以不同的强度照射在 IP 板上，IP 板中荧光物质中 Eu^{2+} 受到激发失去一个电子变为 Eu^{3+} ，失去的电子进入导带并被晶格中卤素离子的空穴俘获，形成潜在影像(光激发荧光中心)。(2) 曝光后，将 IP 板置入 CR 扫描仪内，用红色激光束对曝光后的 IP 板进行扫描，在红色激光激发下(红色激光能量释放被俘获的电子)，电子回到导带并返回它们的初始能级，同时辐射出蓝色荧光，回到初始能级的电子与 Eu^{3+} 结合成激发态的 Eu^{2+} 。辐射的蓝色荧光被 CR 扫描仪内部的光电倍增管接收，同时转换为数字信号，最后得到数字图像。

成像板由表面保护层、辉尽性荧光物质层、基板层和背面保护层组成。辉尽性荧光物质层是成像板的主要部分，辉尽性荧光物质层的主要成分是含有微量铕的钡氟溴化合物晶体。

实验用的射线机采用 GE 公司的 ISOVOLT 320hp，CR 系统采用 GE 公司的 CRx25P，激光束焦点尺寸为 $12.5\text{ }\mu\text{m}$ CRx25P 配套的成像板分 IPU 和 IPS 两种型号。IPU 是超高分辨率成像板，成像板表面为蓝色。IPS 是高分辨率成像板，成像板表面为白色。

3 实验步骤

第一步：依次打开总闸、RF-300EGM 射线机电源，同时射线机在待机状态下预热 10 分钟。

第二步：打开 CR 扫描仪电源，并与计算机并连接。

第三步：打开 Rhythm RT 软件，切换到扫描界面，将 IP 板感光面朝下放置于 CR 扫描仪扫描范围内，点击删除，对 IP 板进行擦除。当天首次使用时应擦除，否则，跳过第三步。



图 1.1 成像板擦除

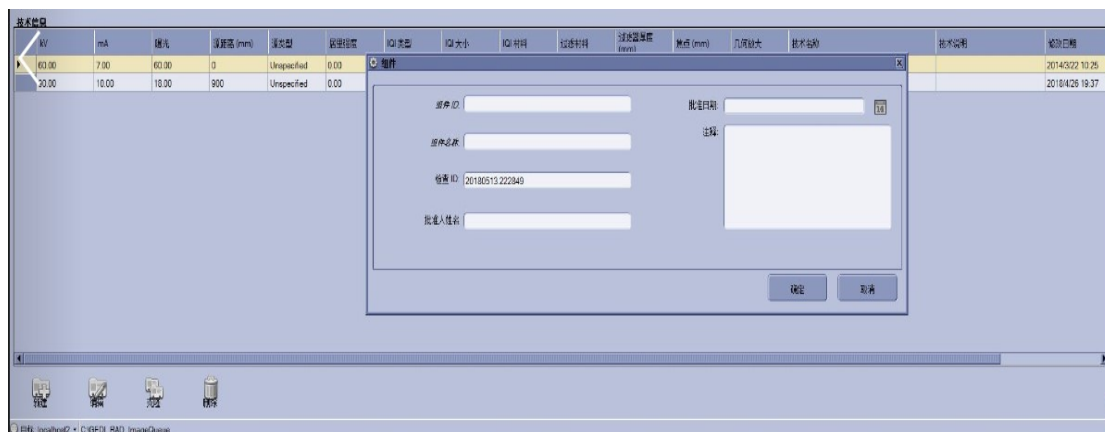
第四步：点击左下角新建后新建组件信息，填写要透照的工件的信息及编号，并将左下角目标位置选为 127.0.0.1。组件信息一个新建一个就可以，例如：

组件 ID: 焊缝 001

组件名称: 对接焊缝

批准人姓名: aobo

注释: 不锈钢

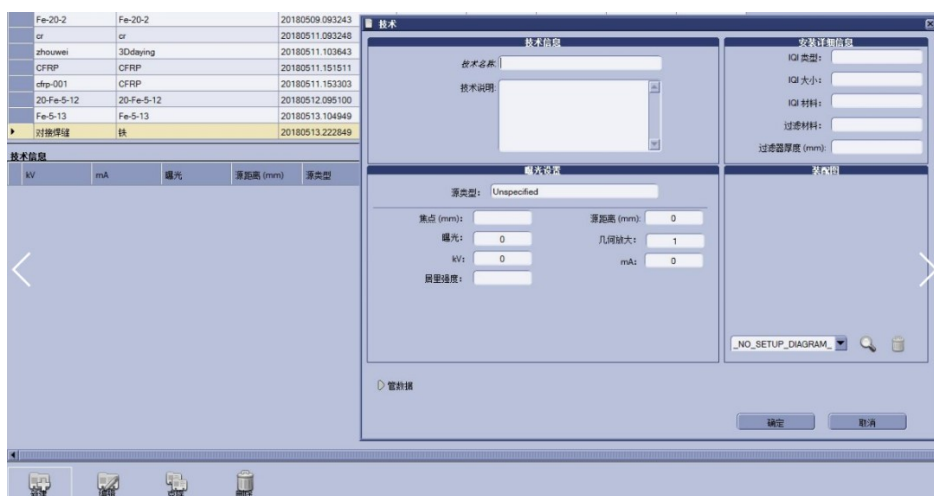


第五步：将工件放置于铅板上射线源中心位置，IP 板用薄纸装好放置于工件的下方（IPU 板蓝色面朝上，IPS 板白色面朝上），将铅字、搭接标记放置于工件母材区，像质计细丝朝外放置于工件上。

第六步：关闭铅门，在射线机控制台上输入透照参数信息（管电压、管电流、曝光时间）后，按射线机电源开关，开源进行透照，透照时间控制在 60s 内。透照结束后将射线源调至待机模式，进探伤室取出 IP 板。

第七步：成像板扫描过程

- ① 将 IP 板感光面朝下（IPU 板蓝色面朝下，IPS 板白色面朝下）放置于 CR 扫描仪扫描范围内。
- ② 打开 Rhythm RT 软件，点击左下角新建技术信息，填写透照参数信息，技术信息每位同学每次做实验时新建就可以。



- ③ 根据 IP 板的类型选择合适的扫描模式后，点击扫描，扫描结束后发送图像，保留图像后取出 IP 板待用。
蓝色板：选择 Weld_IPU_25mu(扫描慢)
白色板：选择 Weld_IPS_50mu(扫描快)



第八步：图像查看

打开 Rhythm Review 软件找到对应项目查看图像。

第九步：数据拷贝

未经允许不得私接 U 盘等存储设备，需要专门 U 盘进行数据拷贝。

第十步：关机

做完实验后，待射线机冷却结束，依次关闭射线机、灯光、计算机、CR 扫描仪及总闸。CR 扫描仪用防尘罩盖好，IP 板以及计算机放回固定位置，确认无误后，锁门后离开实验室。

注意：为了使 X-射线管余热散除，使管头充分冷却。X 射线机停束之后，冷却系统还需要运行 10 至 15 分钟。

4 实验任务

- (1) 对涡轮叶片进行 CR 实验，观察其结果。
- (2) 对焊缝进行 CR 实验，观察其结果。
- (3) 观察某点的灰度，分析其特点。
- (4) 绘制线灰度分布图。
- (5) 计算某个区域的信噪比，与标准规定的最低信噪比做对比。
- (6) 调节图像对比度，观察图像变化。
- (7) 完成实验报告。

X-射线 CR 技术卡

工件编号				零件名称							
验收标准				级别				X射线机			
材料				说明书				焦点尺寸			
CR机器型号				IP板型号				最佳灰度			
										工序号 Op.No.	
编号	部位	厚度/mm	电压kV	电流mA	时间/s	焦距S.F.D mm	增感屏	角度	像质计I.Q.I	灵敏度	备注
工艺说明：											
编制				校对				审定			

实验二 构件射线 DR 成像检测(综合性实验)

1 实验目的

- (1) 掌握射线 DR 成像的原理
- (2) 设计对接焊缝、铸件的 DR 检测工艺
- (3) 掌握平板探测器的暗场、增益、坏像素校正方法
- (4) 总结 DR 检测的特点，与胶片照相进行对比

2 实验原理

非晶硅平板探测器主要由闪烁体层、非晶硅光电二极管、薄膜晶体管阵列(TFT)和读出电路组成。闪烁体层的主要功能是把入射射线转变为荧光，材料一般为碘化铯(CsI)和硫氧化钆($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$)，其中碘化铯晶体具有针状结构，而硫氧化钆一般呈颗粒状结构。相对而言，碘化铯对 X 射线的转换效率高，且分辨率好，而颗粒状结构的硫氧化钆散射影响严重。非晶硅光电二极管的主要功能是把荧光转化为电子，薄膜晶体管阵列用于存储电荷，读出电路将 TFT 存储的电荷顺序读出，并进行处理、放大、A/D 转换，形成数字图像。

DR 成像原理为入射 X 射线撞击闪烁体层，闪烁体吸收射线，并激发原子和分子，这些激发态的原子和分子在退激过程中产生可见光；非晶硅光电二极管将可见光信号转换成电荷；这些电荷随后被 TFT 阵列中的存储电容所收集，存储电荷数量与入射射线的强度成正比；通过读出电路，按一定规律扫描读出各像素的存储电荷，并经过信号放大、A/D 转换等获得数字信号形成 DR 图像。

由于入射光子在转化为电信号的过程中，必须先转化为可见光再转变为电荷，因此称为间接转换型。由于存在可见光的转换，可见光在闪烁体内的散射和漫射造成了图像分辨率的下降，这种图像质量的下降不利于微小缺陷细节的检测。虽然针状碘化铯可以提高对 X 射线的利用及降低散射，但散射光对空间分辨率的影响不能完全消除。

实验设备为 PekinElmer 公司的 XRD0822 非晶硅平板探测器，其中闪烁体材料为碘化铯，成像矩阵为 1024×1024 ，探测器单元尺寸为 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ ，A/D 位数为 16bit。

不开射线源的情况下对平板探测器进行数据采集仍有一定大小的信号输出，此时采集到的图像称为暗场图像。

开启射线源进行检测工作时，实际得到的图像灰度是叠加在暗场图像之上的值，为了正确反映出透照工件内部结构与图像灰度值之间的对应关系，应该设法去除叠加在实际输出响应上的暗场图像值，即进行暗场校正。暗场校正公式为

$$P(x, y) = P_0(x, y) - \text{offset}(x, y) \quad (1)$$

其中 $P(x, y)$ 为暗场校正后图像中点 (x, y) 的灰度值， $P_0(x, y)$ 为暗场校正前图像中点 (x, y) 的灰度值， $\text{offset}(x, y)$ 为探测器预热 30 分钟后，采集一定帧数(如 50 帧)图像平均后的暗场图像中点 (x, y) 的灰度值。

虽然在线性曝光剂量范围内平板探测器每个探测器单元对 X 射线响应是线性的，但不同探测器单元的 X 射线响应系数并不完全一致，即探测器单元存在响应不一致性。响应不一致性带来的后果是相同的入射射线强度但输出不同。因此，必须对平板探测器的输出图像进行增益校正。非晶硅平板探测器增益校正的一般程序为

(1) 探测器初始化。

(2) 获取暗场图像。设置参数，采集 50 帧或更多帧图像得到一幅平均后的暗场图像 $offset(x, y)$ 。

(3) 获取亮场图像。不放置工件的情况下开启射线，采集一张 50 帧平均后获得的亮场图像 $I_{bright}(x, y)$ 。由于实际响应曲线中像元对曝光量是非线性的，为了使用下列线性校正公式进行增益校正，应当选取合适的参数，以免亮场图像中像元响应饱和。亮场图像实验参数为管电压为 100kV，管电流为 2mA，积分时间为 200ms。

(4) 增益校正。增益校正公式为：

$$I(x, y) = \frac{I_{origin}(x, y) - offset(x, y)}{I_{bright}(x, y) - offset(x, y)} \cdot (I_{bright} - offset)_{mean} \quad (2)$$

其中 $I_{origin}(x, y)$ 为原始曝光图像中某点(x,y)的灰度值， $I_{bright}(x, y)$ 为该点在亮场图像中的灰度值， $offset(x, y)$ 为暗场图像中该点的灰度值， $(I_{bright} - offset)$ 为经过暗场校正后的亮场图像。由上式可以计算得到增益校正后的点(x,y)的实际灰度值 $I(x, y)$ 。

完成暗场校正和增益校正后，为了进一步消除坏像素对成像质量的影响，还要做坏像素校正处理。坏像素即坏点，是指对 X 射线强度不响应或响应不良的探测器单元。由于平板探测器的制造工艺复杂，制造过程中难免存在一些不合格像素点，同时某些偏差较大的增益不一致像素，因其普通增益校正方法处理效果不佳，也将其归为坏点。坏点可能是由于闪烁体层缺陷、光电二极管单元损坏、行列驱动线及放大器损坏引起，也可能由于平板探测器采用了多板拼接工艺产生拼接工艺线，该拼接工艺线也可纳入坏线范畴。从成本考虑，允许探测器存在一定数量的坏点，制造商均制定了不同的接收规范，规定了每种坏点的数量、分布及位置作为探测器合格与否的判断依据。按照对射线强度响应灵敏度的差异又可将坏点定义为以下几类^[9]：

(1) 死像素：像素没有响应，或者是响应一个与探测器的射线剂量无关的常量。

(2) 响应过度像素：像素的灰度值大于最小 21×21 个像素区域的中等灰度值 1.3 倍，那么该像素被判定为响应过度坏像素。

(3) 响应不足像素：若像素的灰度值小于最小 21×21 个像素区域的中等灰度值 0.6 倍，那么该像素被判定为响应不足坏像素。

(4) 嘈杂坏像素：在没有射线的情况下，30 到 100 帧的图像系列中的像素标准偏差，大于整个 DDA 的像素的标准偏差的中间值 6 倍，这些像素称为嘈杂像素。

(5) 坏的邻域像素：相邻的 8 个像素是坏像素，该像素也要看作为坏像素。

根据坏像素的分布类型可分为孤立坏点、坏像素簇、坏线。

3 实验步骤

第一步：打开系统电源、稳压器电源、探测器电源，预热 30 分钟。

第二步：双击 DDApp.exe 文件进入软件主界面，如图 2.1 所示。

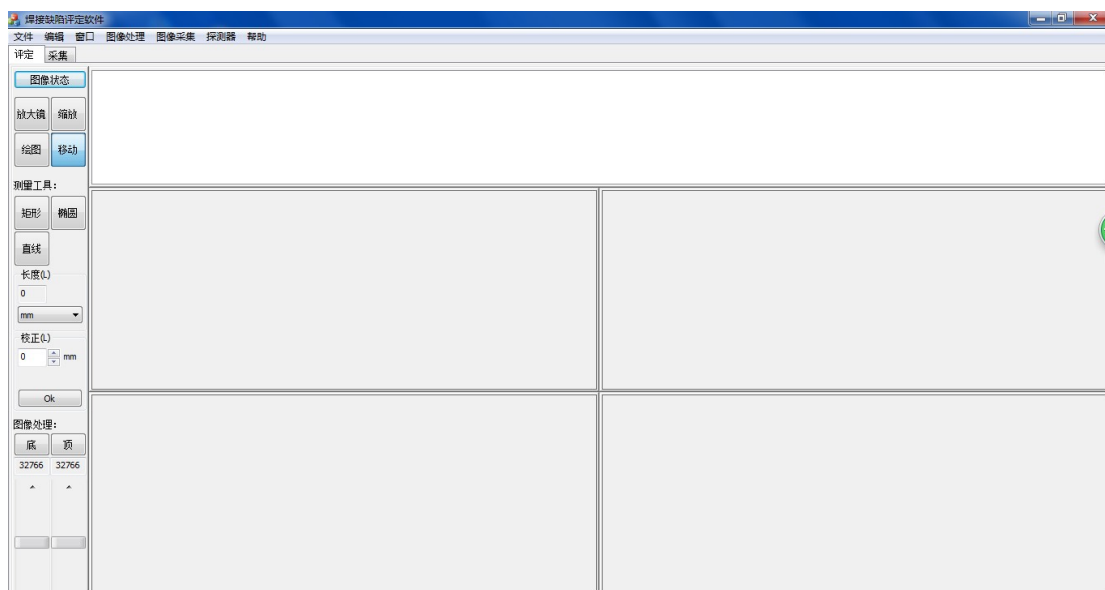


图 2.1 软件主界面

第三步：探测器初始化。点击“初始化”之后探测器开始初始化过程，此过程大约持续数秒。初始化完成后弹出初始化成功提示窗口，如图 2.2 所示。每次重新打开软件或探测器电源后都需要对探测器进行初始化，初始化即发出探测器将要运行的命令，初始化任务可在软件窗口左侧的采集区的初始化模块进行，也可以在菜单栏“探测器”下进行。



图 2.2 初始化完成提示窗

第四步：探测器参数设置，点击“参数设置”按钮，出现如图 2.3 所示窗口。

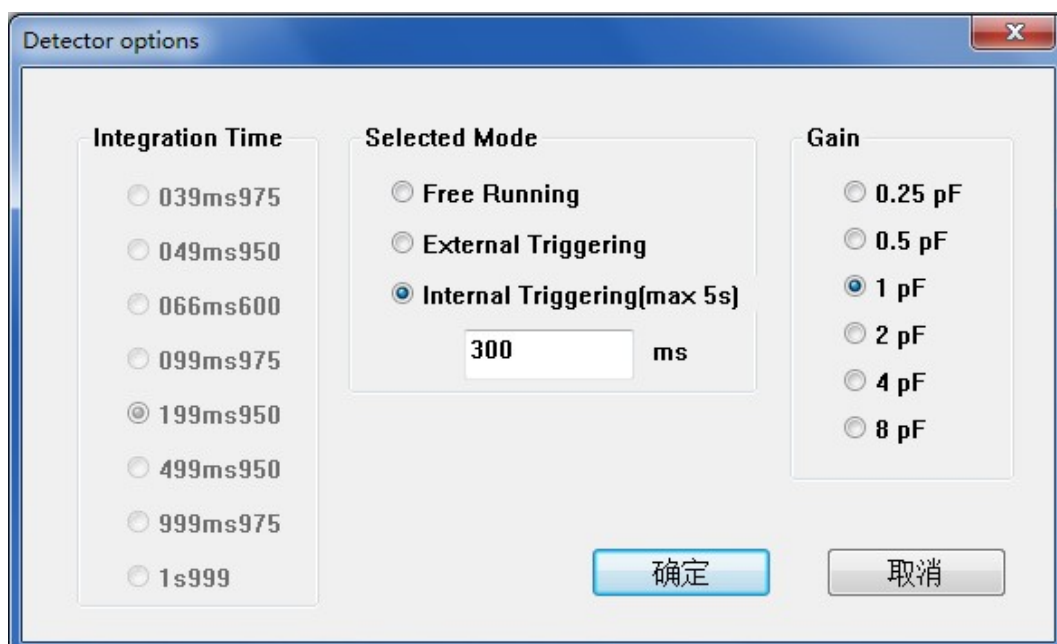


图 2.3 探测器参数设置窗口

积分时间选择(Integration Time): 在 Free Running 模式和 External Triggering 模式下可进行选择, 在 Internal Triggering 模式下呈灰色状态不可选择。

模式选择(Selected Mode): 有 Free Running 模式, External Triggering 模式和 Internal Triggering 三种模式可选择:

Free Running 模式: 只有 8 种积分时间可供选择, 探测器根据所选择的积分时间持续的输出多帧图像, 这是默认模式。

External Triggering 模式: 探测器被外部触发脉冲触发时, 根据所选积分时间采集一帧图像, 并在此积分时间内忽略其他触发信息, 直到该帧图像采集完成。

Internal Triggering 模式: 探测器可进行(最大 5s)之内任意积分时间的图像采集, 具体值在输入框内输入。

Gain 模块为探测器增益设置, 参数设置完成后点击确定。出现“参数设置成功”提示窗, 再点击确定按钮完成参数设置。

第五步: 加载校正文件。为了得到高质量的 DR 图像, 探测器采集得到的原始图像需经过暗场校正、增益校正和坏像素校正。点击“加载校正文件”出现如图 2.4 所示窗口。

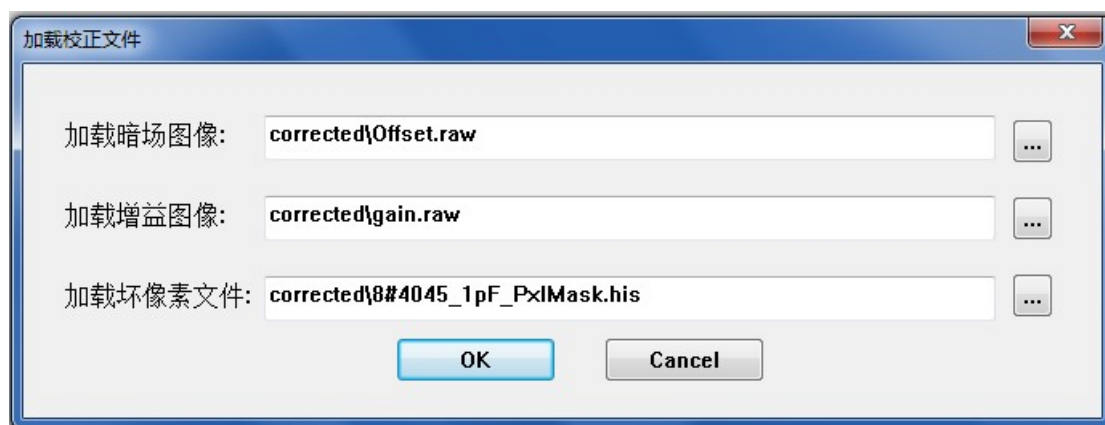


图 2.4 加载校正文件窗口

默认的校正文件存储在 corrected 文件夹下, 如无修改, 直接点击“OK”可加载完成。也可自行指定存储路径, 如需选择其他位置的文件作为校正文件则可通过点击窗口右侧按钮进行路径和校正文件的选择。文件选择完成后点击“OK”, 将弹出校正文件加载成功提示窗口, 继续点击“确定”完成校正文件的加载。

(1) 单帧图像采集

第一步: 点击“单帧采集”出现如图 2.5 所示窗口, 进行文件的命名和存储路径选择。

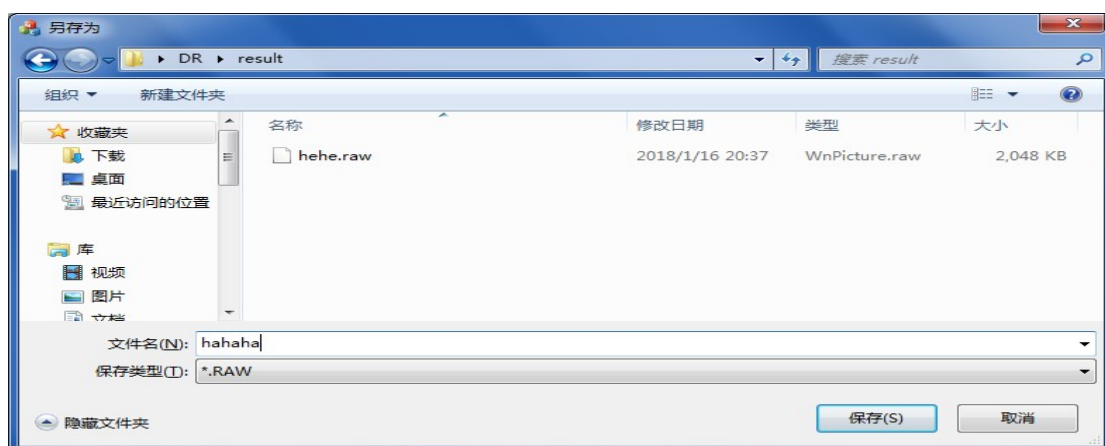


图 2.5 存储路径选择和文件命名

第二步：开射线源。文件名和路径选择完成后点击保存，出现如图 2.6 所示开射线源提示窗，在确认射线机和探测器均预热 30 分钟以上时可开射线源，待射线能量达到设置值时，点击确定开始采集图像。

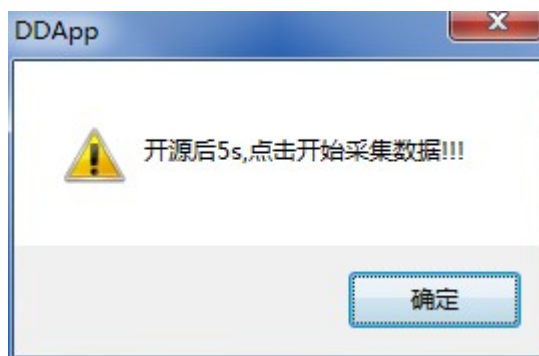


图 2.6 开射线源提示

第三步：完成单帧图像采集。图像采集结束后自动弹出采集完成提示信息窗口，点击确定完成图像采集。

(2) 多帧图像平均采集

第一步：设置帧数，文件名及文件存储路径选择。点击“多帧平均”后，弹出如图 2.7 所示窗口，其中采集帧数是探测器实际采集的帧数，所采集的数据用于计算最后存储的单张图像。较大的帧数值可使结果更稳定可靠，一般帧数大于 30。

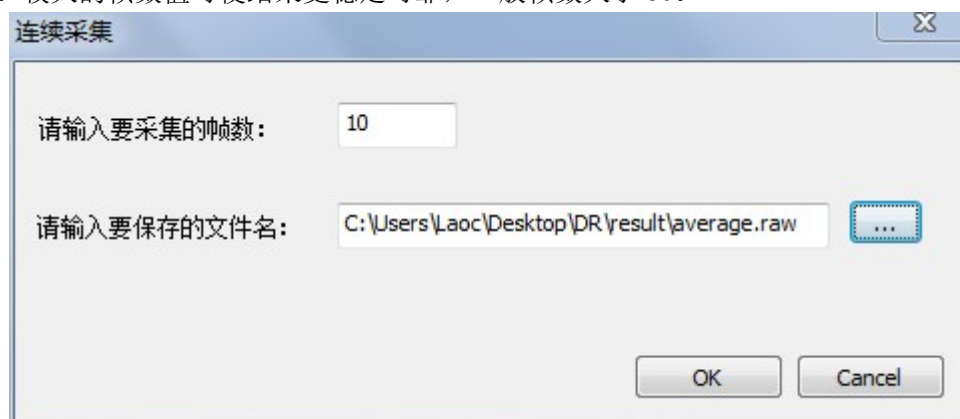


图 2.7 多帧平均设置

第二步：开射线源。点击 OK 按钮开始采集图像。

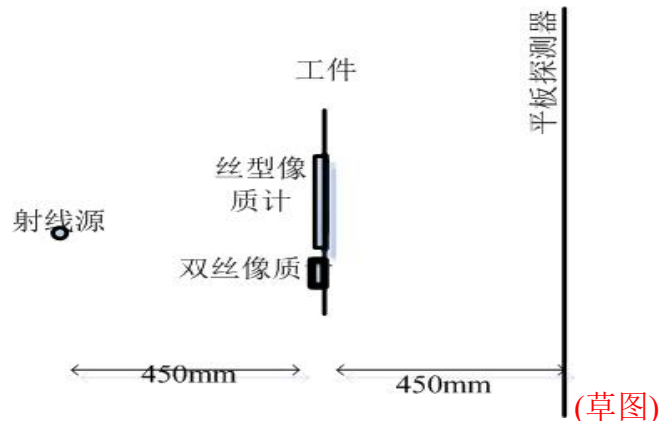
第三步：多帧平均采集完成。图像采集结束后自动弹出采集完成提示信息窗口，点击确定完成图像采集。

注意：为了使 X-射线管余热散除，使管头充分冷却。X 射线机停束之后，冷却系统还需要运行 10 至 15 分钟。

4 实验任务

- (1) 对焊缝或其它工件进行 DR 检测实验，分别做单帧采集、多帧平均采集，分析 DR 检测结果
- (2) 对焊缝进行 CR 实验，观察其结果。
- (3) 观察某点的灰度，分析其特点。
- (4) 绘制线灰度分布图。
- (5) 计算某个区域的信噪比，与标准规定的最低信噪比做对比。
- (6) 调节图像对比度，观察图像变化。
- (7) 完成实验报告。

射线 DR 检测工艺卡(参考)

产品编号		#1(铝板搭接)		产品名称		搭接焊缝		焊接方法		氩弧焊		
规格				材料		AL		验收等级		AB		
验收标准		-		照相等级		AB		检测时机		焊后 24h		
X 射线机型号		ISOVOLT 320M2/0.4-1HP		焦点尺寸		0.4mm		平板型号		XRD 0822 AP16		
闪烁体类型		碘化铯		平板 预热时间		30min		平板校正		暗场校正、增益校正、坏像素校正		
图像 A/D 数		16 位		图像灰度		>20000		透照方式		源在外单壁透照		
工件偏移		0mm		探测器偏移		0mm		采集帧数		>30		
采集模式		内部触发		像质计材料		AL		像质计制作标准		HB7684-2000		
编号	部位	采集图像处理方式	管电压 kV	管电流 mA	积分时间 ms	焦距 F mm	物距 f mm	放大倍数	角度	透照次数	灵敏度	备注
1	焊缝	多帧平均	75	5	350	900	450	2	90	1	15	
2	母材区	多帧平均	70	5	350	900	450	2	90	1	16	
透照示意图												
 射线源 工件 丝型像质计 双丝像质计 平板探测器 450mm 450mm (草图)												
图像观察的主要处理方法			缩放/平移		窗宽/窗位		锐化		特效显示			
							拉普拉斯		浮雕			
图像质量基本要求			线性 IQI		15		不清晰度		8 号丝 0.32mm			
			信噪比		>225		SR _b		200um			
编制	II 级人员		审核		III 级人员		批准		III 级人员			

射线 DR 检测工艺卡

产品编号				产品名称				焊接方法				
规格				材料				验收等级				
验收标准				照相等级				检测时机				
X 射线机型号				焦点尺寸				平板型号				
闪烁体类型				平板预热时间				平板校正				
图像 A/D 数				图像灰度				透照方式				
工件偏移				探测器偏移				采集帧数				
采集模式				像质计材料				像质计制作标准				
编号	部位	采集图像 处理方式	管电 压 kV	管电 流 mA	积 分 时间 ms	焦 距 F mm	物 距 f mm	放 大 倍数	角 度	透 照 次数	灵 敏 度	备注
1												
2												
透照示意图												
图像观察的主要处理方法			缩放/平移		窗宽/窗位		锐化		特效显示			
图像质量基本要求			线性 IQI				不清晰度					
			信噪比				SR _b					
编制				审核				批准				

实验三 CT 仿真实验(综合性实验)

1 实验目的

- (1) 用 matlab 中的 radon 函数获取 Shepp-Logan 头模型的平行束投影数据
- (2) 用 matlab 中的 radon 函数实现图像重建
- (3) 用 matlab 中的 fanbeam 函数获取 Shepp-Logan 头模型的扇形束投影数据
- (4) 用 matlab 中的 ifanbeam 函数实现图像重建
- (5) 掌握二维 CT 重建基本理论

2 实验原理

- (1) 平行束滤波反投影 CT 仿真重建原理

平行束滤波反投影 CT 的基本思想如下：假设一个理想的 X 射线源，它能发出极细的 X 射线笔束，在它对面放一检测器。测得 X 射线源发出强度为 I_0 ，和通过工件吸收后到达检测器的 X 射线强度为 I ，再将检测器和 X 射线源在观察平面内，同时作相反平移一定步数 N_t 。对于每平移一步都要做同样的计量。移动的范围要覆盖整个平面，如此获得一组数据。

然后旋转一个小角度 $\Delta\phi$ ，再同步平移 N_t 步，获得新角度下的另外一组数据。如此重复，直到旋转 N_ϕ 次，做 $N_\phi\Delta\phi=180^\circ$ 旋转，取得 N_ϕ 组数据而止。

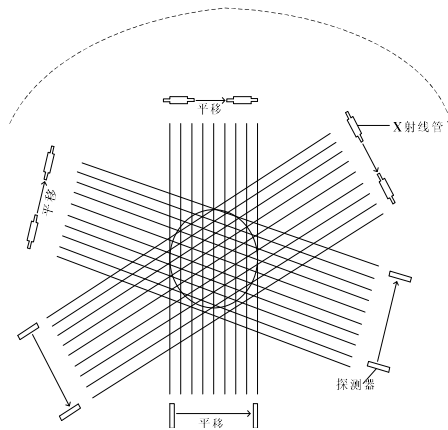


图 3.1 平行束投影示意图

利用 matlab 获得仿真模型的投影数据，投影数据就是反应模型内部特征的数据信息。利用计算机可以将获得的数据进行转化，数据采集，也就是得到携带有物体内部特征信息的数据。所采用的物理测量系统包括放射源、检测器及配套的机械、电路设备。为进行计算机处理，系统还需将测量得到的模拟量转化成数字量。平行束滤波重建图像运用的是平移和旋转的扫描形式，X 射线源在某一角度下水平移动，将工件断层平面透照后旋转一角度，多次重复扫描，在此过程中探测器要朝着相反方向运动来采集 X 射线，这就获得了投影数据，再运用逆 radon 变换将模型的各个方向的投影数据反投影。

- (2) Shepp-Logan 头部模型

利用 matlab 工具我们先建立经典头部模型，此仿真模型是由一系列具有给定密度，大小各异、位置不同的椭圆形状构成，头部仿真模型参数如下表 3-1。

A 表示椭圆的附加值，a 表示椭圆的水平方向半轴长度，b 表示椭圆的垂直方向的半轴长度，X0 表示椭圆中心的横坐标，Y0 表示椭圆中心的纵坐标，phi 表示椭圆水平方向半轴与图像 X 轴之间的夹角。建立一个经典头部模型如图 3.2。

表 3-1 头部模型数据

标号数据 参数	A	a	b	X0	Y0	phi
椭圆 1	1	0.69	0.92	0	0	0
椭圆 2	-0.8	0.6624	0.8740	0	-0.0184	0
椭圆 3	-0.2	0.110	0.3100	0.22	0	-18
椭圆 4	-0.2	0.1600	0.4100	-0.22	0	18
椭圆 5	0.1	0.2100	0.2500	0	0.35	0
椭圆 6	0.1	0.0460	0.0460	0	0.1	0
椭圆 7	0.1	0.0460	0.0460	0	-0.1	0
椭圆 8	0.1	0.0460	0.0230	-0.08	-0.605	0
椭圆 9	0.1	0.0230	0.0230	0	-0.606	0
椭圆 10	0.1	0.0230	0.0460	0.06	-0.605	0



图 3.2 头部模型

(3) radon 函数说明

$R = \text{radon}(I, \theta)$

$[R, Xp] = \text{radon}(I, \theta, N)$

如果 θ 是标量，返回 R 是列向量，表示 θ 角度下图像 I 的 radon 变换。如果 θ 是向量，返回 R 是矩阵，每一列表示某一 θ 角度下图像 I 的 radon 变换。忽略 θ ，则默认为 $0:179$ 的向量。返回行向量 Xp ，投影数据 R 的每一行的射线坐标。

I 可以是数值型、逻辑型的二维非稀疏矩阵， θ 是双精度型。

已设 N ，则用 N 个点计算投影，且 R 有 N 行。

未设 N ，则用 $2 * \text{ceil}(\text{norm}(\text{size}(I) - \text{floor}((\text{size}(I) - 1)/2) - 1)) + 3$ 个点计算投影，即使射线通过图像对角线，这个值也足够。

mfilename 函数中， I 是第一个变量， θ 是第二个变量， N 是第三个变量。如果生成投影的行维度 r 不等 N ，则进行 N 等分，线性插值，变成行维度为 N 的投影。

(4) iradon 函数说明

$I = \text{iradon}(R, \theta, \text{interp}, \text{filter}, \text{frequency_scaling}, \text{output_size})$ %matlab 语句
经过 FFT 后频域中的投影值是 2 的幂。

R 是投影矩阵。

θ 可以是一个包含所有扫描角度的向量，这时每两个相邻角度间隔相等；也可以是一个标量值，等于相邻两个扫描角度的间隔。

interp 是插值函数，有以下几种差值方式可以选择：

nearest: 最邻近插值方法 (nearest neighbor interpolation)。这种插值方法在已知数据的最邻近点设置插值点，对插值点的数值进行四舍五入，对超出范围的数据点返回 NaN。

linear: 线性插值 (linear interpolation)，这是 interp 中的默认数值。该方法采用直线将相邻的数据点相连，对超出数据范围的数据点返回 NaN。

spline: 三次样条插值 (cubic spline interpolation)，该方法采用三次样条函数获取插值数据点，在已知点为端点的情况下，插值函数至少具有相同的一阶和二阶导数。

pchip: 分段三次厄米多项式差值 (piecewise cubic Hermite interpolation)。

cubic: 三次多项式插值，与分段三次厄米多项式插值方法相同。

v5cubic: MATLAB5 中使用的三次多项式插值

(5) 扇形束投影重建算法

由于扇形束 CT 是单个射线源、多个探测器的扫描方式，射线源产生角度比较大、厚度薄的扇形射线束，一般同时使用 $N(N>1)$ 个探测器来检测。以扇形的方式采集投影数据时，探测器的分布可以有两种不同的方式。等角型则是探测器按等角度分布的，等距型则是探测器按等距离分布的，所以扇形束投影重建算法又可分为等角射线扇形束 (如图 3.3(a) 所示) 和等距射线扇形束 (如图 3.3(b) 所示)。

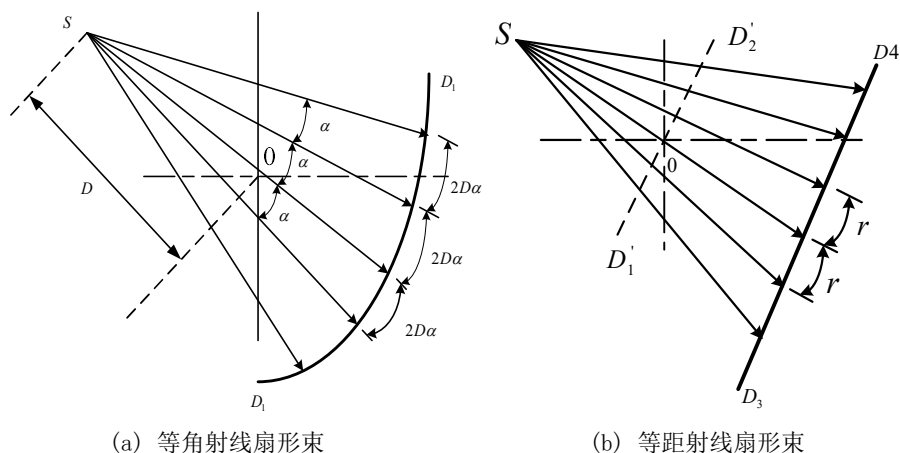


图 3.3 两种扇形束射线

(5) ifanbeam 函数说明

$I = \text{ifanbeam}(F, D)$ %由扇形束投影数据重建图像

$I = \text{ifanbeam}(\dots, \text{param1}, \text{val1}, \text{param2}, \text{val2}, \dots)$

$[I, H] = \text{ifanbeam}(\dots)$

D 是扇形束顶点到旋转中心的距离。

F 的每 1 列表示一个角度下的扇形束采样数据。

参数	说明
'FanCoverage'	指定旋转角度范围 {'cycle'} — $[0, 360)$. 'minimal' — 所需最小旋转角度

参数	说明
'FanRotationIncrement'	指定旋转角度增量, 单位为度, 默认为 1 度
'FanSensorGeometry'	指定探测器的排布方式 'arc' — 探测器弧形排布. 默认值 'line' — 探测器等距线性排布
'FanSensorSpacing'	指定探测器间的间隔 'arc' 单位为度. 默认为 1. 'line', 单位为像素
'Filter'	指定滤波器
'FrequencyScaling'	Scalar in the range (0,1] that modifies the filter by rescaling its frequency axis.
'Interpolation'	插值方式 'nearest' — Nearest-neighbor { 'linear' } — Linear 'spline' — Piecewise cubic spline 'pchip' — Piecewise cubic Hermite (PCHIP) 'v5cubic' — The cubic interpolation from MATLAB® 5
'OutputSize'	指定重建图像矩阵的大小

3 实验步骤

3.1 平行束滤波反投影 CT 仿真重建

第一步: 打开 matlab 软件, 打开文件-新建文件

第二步: 输入以下代码

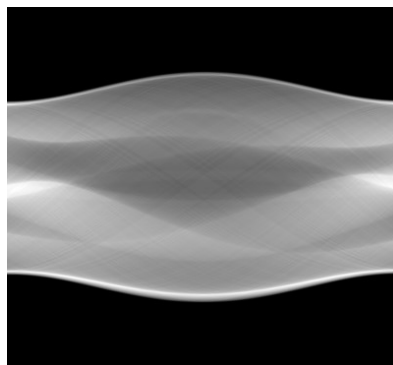
```
P=phantom(256);           %建立头部模型
figure,imshow(P);          %显示头部模型
theta=0:1:179;             %设置投影角度
[R1, xp]=radon(P, theta);   %获取平行束投影
figure,imshow(R1, []);      %显示平行束投影
IR1=iradon(R1, theta, 'linear', 'Shepp-Logan', 0.85); %重建
figure,imshow(IR1, []);     %显示重建结果
```

第三步: 观察实验结果

如: 仿真实验采用 0-180 度, 角度间隔 0.45 度, 投影数 401, 应用线性插值方式和 shepp-logan 滤波器得到的实验结果如图 3.4。



(a) 头部原始图



(b) 头部投影图像



(c) 头部滤波重建图

图 3.4 头部模型在线性插值方式 S-L 滤波器下实验结果

3.2 扇形束 CT 仿真重建

第一步：打开 matlab 软件，打开文件-新建文件

第二步：输入以下代码

(1)

```
ph = phantom(128);
d = 100;
F = fanbeam(ph, d);
I = ifanbeam(F, d);
imshow(ph), figure, imshow(I, []);
```

(2)

```
ph = phantom(128);
P = radon(ph);
[F, obeta, otheta] = para2fan(P, 100, ...
    'FanSensorSpacing', 0.5, ...
    'FanCoverage', 'minimal', ...
    'FanRotationIncrement', 1);
phReconstructed = ifanbeam(F, 100, ...
    'FanSensorSpacing', 0.5, ...
    'Filter', 'Shepp-Logan', ...
    'OutputSize', 128, ...
    'FanCoverage', 'minimal', ...
```

```
'FanRotationIncrement',1);
```

```
imshow(ph), figure, imshow(phReconstructed, [])
```

第三步：观察实验结果。

4 实验任务

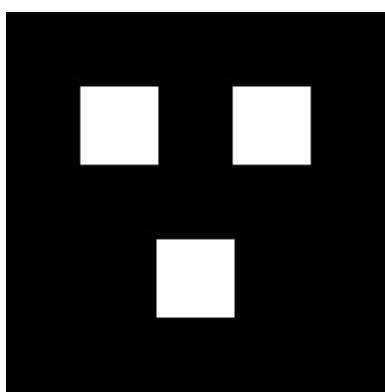
(1) 自建 Shepp-Logan 头部模型，大小为 256×256 ，分别进行平行束投影重建和扇形束投影重建，显示重建结果。

(2) 运用 matlab 自建一个 200×200 的正方形模型，在 200×200 的正方形里再建几个小正方形，在大正方形里建三个都是 40×40 的小正方形，三个小正方形中心坐标分别是 $(60, 60)$ ， $(60, 140)$ ， $(140, 100)$ ，大正方形是黑色的，三个小正方形是白色的，设计并编写的平行束投影 CT 重建的程序，进行仿真实验验证，观察并记录实验结果。

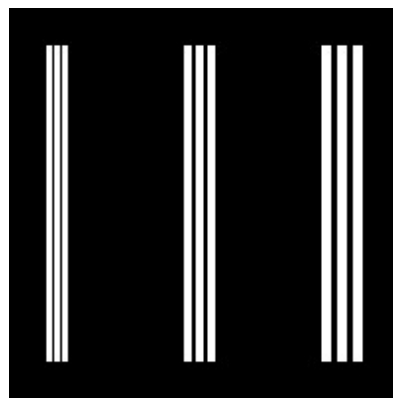
设计：在 180 度范围内采集投影数据，角度间隔 0.45 度，采集投影数 401，经过线性插值和“shepp-logan”滤波器下，设计并编写的平行束投影 CT 重建的程序，进行仿真实验验证，观察并记录实验结果。

(3) 另外建一个不同的模型，原始矩阵大小和重建矩阵大小均为 200×200 ，模型最左边的三条白线都 160×2 ，中间三条白线都是 160×3 ，最右边是 160×4 ，仿真实验采用 0-180 度，角度间隔 0.45 度，投影数 401，应用紧邻插值方式和 Ram-lak 滤波器得到的实验结果。

(4) 分析插值方式、滤波器、投影数量对重建图像质量的影响。



(a) 200×200 正方形原始图



(b) 200×200 九条白线的原始图

图 3.5 设计模型

(5) 完成实验报告。

实验四 构件工业 CT 成像检测(演示性实验)

1 实验目的

- (1) 掌握锥束 CT 成像的原理
- (2) 投影图像数据采集
- (3) 设计锥束 CT 检测工艺
- (4) 总结锥束 CT 检测的特点, 与二维成像检测进行对比

2 实验原理

工业 CT 是工业计算机层析成像的简称, 是国际公认最有效的无损检测手段, 与其它无损检测手段相比具有成像直观、密度分辨率高、不受试件几何结构限制等优点, 使长期以来困扰无损检测人员的缺陷空间定位、深度定量及综合定性问题有了更直接的解决途径。工业 CT 的主要技术特点如下:

- (1) 工业 CT 给出试件的断层扫描图像, 从图像上可以直观地看到检测目标细节的空间位置、形状大小, 目标不受周围细节特征的遮挡, 图像容易识别和理解。
- (2) 工业 CT 具有突出的密度分辨能力, 高质量的 CT 图像中密度分辨率可达 0.1% 甚至更小, 比常规射线技术高一个数量级。
- (3) 工业 CT 具有很高的空间分辨率, 显微 CT 成像系统的空间分辨率已达到亚微米级。
- (4) 工业 CT 采用高性能探测器, 动态范围可达 1 万以上, 胶片照相动态范围一般为 200~1000, 图像增强器的动态范围一般可达 500~2000。
- (5) 工业 CT 图像是数字化的结果, 从中可直接给出像素值, 尺寸甚至密度等物理信息, 数字化的图像便于存储、传输、分析和后续处理。

随着平板探测器的成功研制, 锥型束扫描方式和 FDK 重建算法在工业 CT 中得到了最广泛的应用。FDK 算法是 1984 年 Feldkamp、Davis 和 Kress 三人针对锥束几何圆形扫描轨迹提出的一种最经典的近似三维图像重建算法, FDK 算法认为锥束投影几何中非中心平面的投影数据都可以近似看成是通过中心平面的扇形束以射线源点为支点倾斜一个角度得到的, 然后在进行一定的几何修正, 同时应用扇形束滤波反投影算法, 完成扫描物体的三维重建。此后许多改进方法, 包括一些精确三维重建算法, 都以此为基础。虽然 FDK 算法是近似的重建算法, 但由于它具有数学形式简单、应用性强等优点, 在工程中得到了广泛应用。FDK 算法包括以下三个步骤:

- (1) 对投影数据进行加权处理, 适当地修正体素到源点的距离和角度差值;
- (2) 对加权后的投影数据水平方向上进行滤波;
- (3) 确定反投影路径, 沿着 X 射线方向进行加权反投影。

具体的 FDK 算法的公式如下:

$$\bar{p}(\beta, a, b) = (w(a, b) \cdot p(\beta, a, b)) * g(a)$$
$$f_{FDK}(x, y, z) = \int_0^{2\pi} \frac{R^2}{U(x, y, \beta)^2} \bar{p}(\beta, a, b) d\beta$$

式中: $\bar{p}(\beta, a, b)$ ——投影数据;

$g(a)$ ——Ramp 滤波函数；
R ——圆轨道的半径。

3 实验步骤

第 1 步 打开“工业 CT 投影数据采集系统”软件主界面。界面分为“串口设置区”、“转台控制区”、“数据收发区”和“探测器控制区”四个部分，各区域已用方框隔开如下图。



第 2 步 连接串口：点击串口复选框，选择串口（当前为 COM4）

若只有一个备选栏则点击波特率复选框选择波特率为“9600”，点击“连接串口”按钮。此时，串口状态显示为“串口已连接”，如下图所示。



第 3 步 点击“启动转台”成功启动则会显示“转台已启动”，点击“确定”可进入下一步。



第 4 步 启动转台后点击“复位”按钮等待转台复位，期间不要做任何操作，防止命令不一致导致程序卡死。当显示“已复位”时，可继续下一步操作。

第 5 步 复位后，可进行转台调试工作。选择步距复选框中备选的角度值亦可自行输入角度

值（不得大于 360），点击  或  机械转台将会按照指定的方向进行旋转。为方便观察，角度值逆时针为正，顺时针为负。下图所示含义为转台从当前位置顺时针旋转 5°。



当显示“已完成!”后方可继续调试。在显示“已完成!”前不可继续点击其他按钮，指令

不一致会导致电机卡死。  和  按钮设置有累加，即从当前位置继续旋转。



第 6 步 调试完成需**复位**，接着可在“探测器控制区”进行操作。点击“初始化探测器”按钮，**耐心等待**后显示“初始化完成”，即可进行下一步。



如若显示“Error nr.:28”表示探测器未正常启动，检查网线（绿色）是否查牢，**等待一段时间**后重试，若在线网插牢情况下依旧无法初始化，则需关闭软件重试。

第 7 步 点击“参数设置”后显示“参数设置完成”即为成功。继续点击“加载校正文件”出现“加载校正文件成功!”继续下一步。

第 8 步 点击“单帧采集”按钮，等待片刻后显示“请开源!!!”**打开射线源后等待加载电压电流达到标定值后点击“确定”按钮。**

稍等片刻后显示“采集图像数据校正结束!!!”点击“确定”按钮

即可采集校正后的 360 幅图像。整个采集过程大致需要 14 分钟，请耐心等待，不要点击其他按钮防止出错。可在当前角度处观察当前转台的位置，在数据收发区观察发送的指令。

	proj0001.raw	2018\5\24 星期四 21:24	RAW 文件	2,048 KB
	proj0002.raw	2018\5\24 星期四 21:24	RAW 文件	2,048 KB
	proj0003.raw	2018\5\24 星期四 21:24	RAW 文件	2,048 KB
	proj0004.raw	2018\5\24 星期四 21:24	RAW 文件	2,048 KB
	proj0005.raw	2018\5\24 星期四 21:24	RAW 文件	2,048 KB
	proj0006.raw	2018\5\24 星期四 21:24	RAW 文件	2,048 KB
	proj0007.raw	2018\5\24 星期四 21:25	RAW 文件	2,048 KB
	proj0008.raw	2018\5\24 星期四 21:25	RAW 文件	2,048 KB
	proj0009.raw	2018\5\24 星期四 21:25	RAW 文件	2,048 KB
	proj0010.raw	2018\5\24 星期四 21:25	RAW 文件	2,048 KB
	proj0011.raw	2018\5\24 星期四 21:25	RAW 文件	2,048 KB
	proj0012.raw	2018\5\24 星期四 21:25	RAW 文件	2,048 KB
	proj0013.raw	2018\5\24 星期四 21:25	RAW 文件	2,048 KB
	proj0014.raw	2018\5\24 星期四 21:25	RAW 文件	2,048 KB
	proj0015.raw	2018\5\24 星期四 21:25	RAW 文件	2,048 KB
	proj0016.raw	2018\5\24 星期四 21:25	RAW 文件	2,048 KB
	proj0017.raw	2018\5\24 星期四 21:25	RAW 文件	2,048 KB
	proj0018.raw	2018\5\24 星期四 21:25	RAW 文件	2,048 KB
	proj0019.raw	2018\5\24 星期四 21:25	RAW 文件	2,048 KB
	proj0020.raw	2018\5\24 星期四 21:25	RAW 文件	2,048 KB
	proj0021.raw	2018\5\24 星期四 21:25	RAW 文件	2,048 KB
	proj0022.raw	2018\5\24 星期四 21:25	RAW 文件	2,048 KB
	proj0023.raw	2018\5\24 星期四 21:25	RAW 文件	2,048 KB
	proj0024.raw	2018\5\24 星期四 21:25	RAW 文件	2,048 KB
	proj0025.raw	2018\5\24 星期四 21:25	RAW 文件	2,048 KB
	proj0026.raw	2018\5\24 星期四 21:25	RAW 文件	2,048 KB

采集的图像名为“proj0xxx”数字为对应的角度值 proj 为 project 缩写，表示投影的含义。当采集完 360 幅图像后关掉射线源。对转台进行复位。

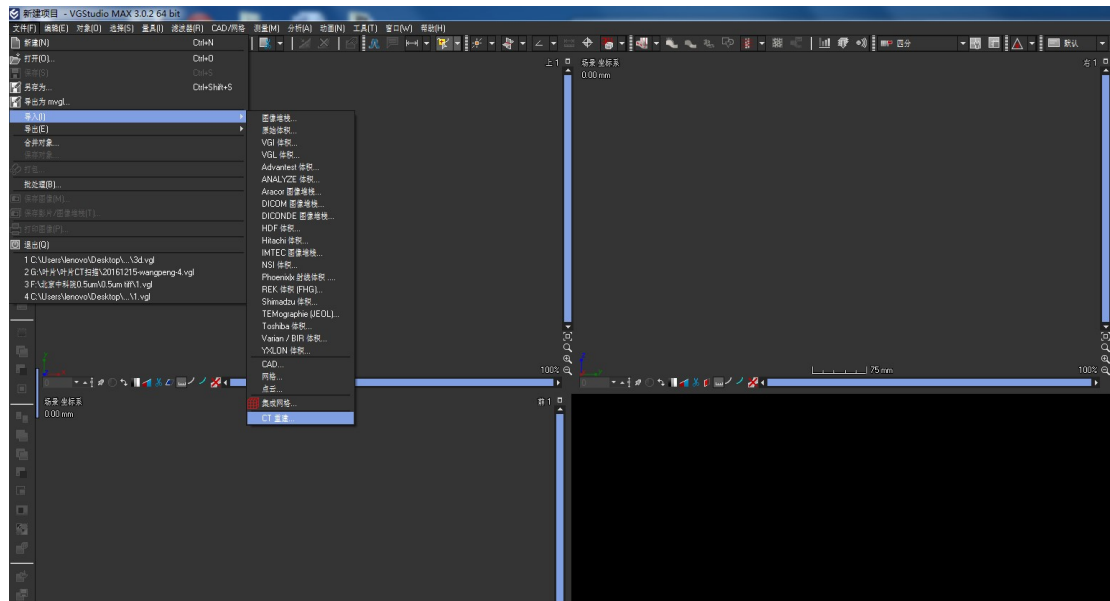
第 9 步 “采集原始图像”按钮用于采集一张未经校正的原始图像，请开源后点击可进行对比。

注意：为了使 X-射线管余热散除，使管头充分冷却。X 射线机停束之后，冷却系统还需要运行 10 至 15 分钟。

4 CT 重建

第 1 步：双击 VGStudio MAX3.0，启动软件。

第 2 步：单击文件-导入-CT 重建



第3步：进入CT重建界面。

常规系统几何：选择锥束CT

算法优化：选择质量

投影处理：选择对数化与已过滤的反向投影

算法：选择FBP

FBP选项-滤波器模式选择Shepp-Logan，内插模式选择线性

计算模式：默认

CT 重建

重建方法

常规系统几何

选择CT

信息

锥束 CT: 标准圆轨道, 使用2D探测器
 扇束 CT: 标准圆轨道, 使用线性探测器
 平行束 CT: 标准圆轨道, 使用平行X光射束
 平面 CT: 平面 CT (分屏成像几何体)
 螺旋 CT: 螺旋轨道, 使用2D探测器
 查看参考手册 (帮助) 显示手册, 可获得更多关于系统几何体与坐标系的信息。

算法优化

☒ 质量
☐ 性能

信息

为质量优化重建;

投影处理

☐ 未过滤的反向投影
☐ 已过滤的反向投影
☒ 对数化与已过滤的反向投影

信息

投影数据将由亮度/暗度参考值校准, 并经过对数化后, 使用Feldkamp, Davis 与 Kress (FDK) 进行重建。

算法

FBP (默认)

信息

FBP: 标准已过滤反向投影算法
 ART: 代数重建算法, 不可用于切片预览!

ART 选项

迭代: 2 : 10
 松弛因子: 0.10 : 0.5

信息

ART 的重建流程次数, 以及松弛因子的数量。

FBP 选项

滤波器模式: Shepp-Logan
 内核模式: 线性

信息

用于预处理的高通滤波器。

计算模式

GPU (OpenGL, 单个与多个GPU)

信息

反向投影的计算模式。
 如果在首选项内已选择了强制模式, 则该模式将被禁用。
 [见 编辑 > 首选项 > 常规 > CT 重建]

找到已经存在的结果文件, 将被覆盖

加载参数

保存参数

投影预览

正弦图视图

切片预览

< 上一步(B)

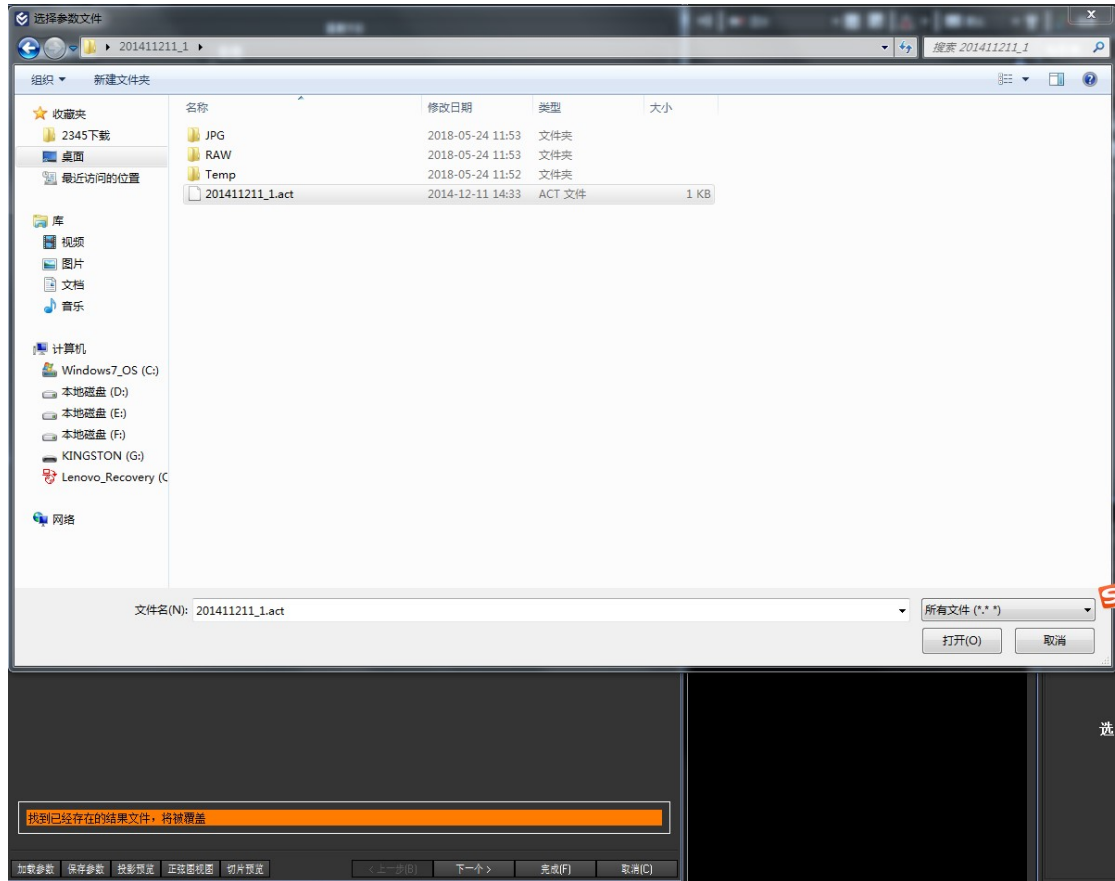
下一个 >

完成(F)

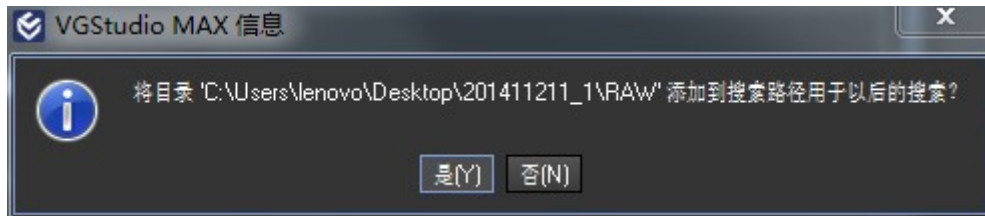
取消(C)

第 4 步: 单击加载参数, 选择*.act, 如图所示文件名, 再点击打开。

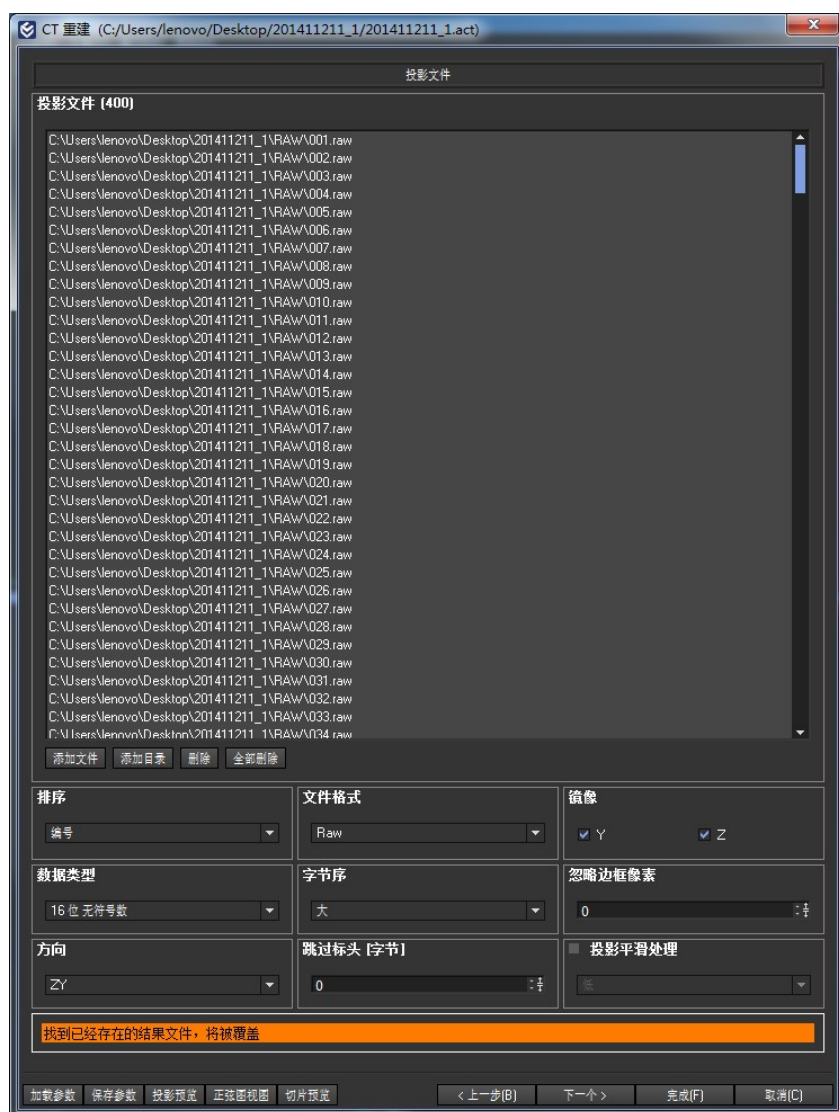
25



第 5 步：搜索 001.raw 所在文件夹，选择 001.RAW 文件，选择是。



第 6 步：单击“下一步”，加载所有投影图像。



第 7 步: 单击“下一步”。

第 8 步: 单击“下一步”...

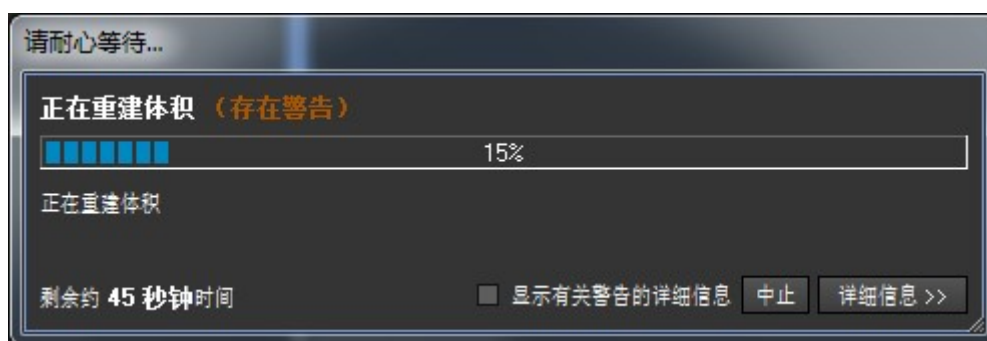
第 9 步: 选择结果文件名称, 选择重建图像保存地址。



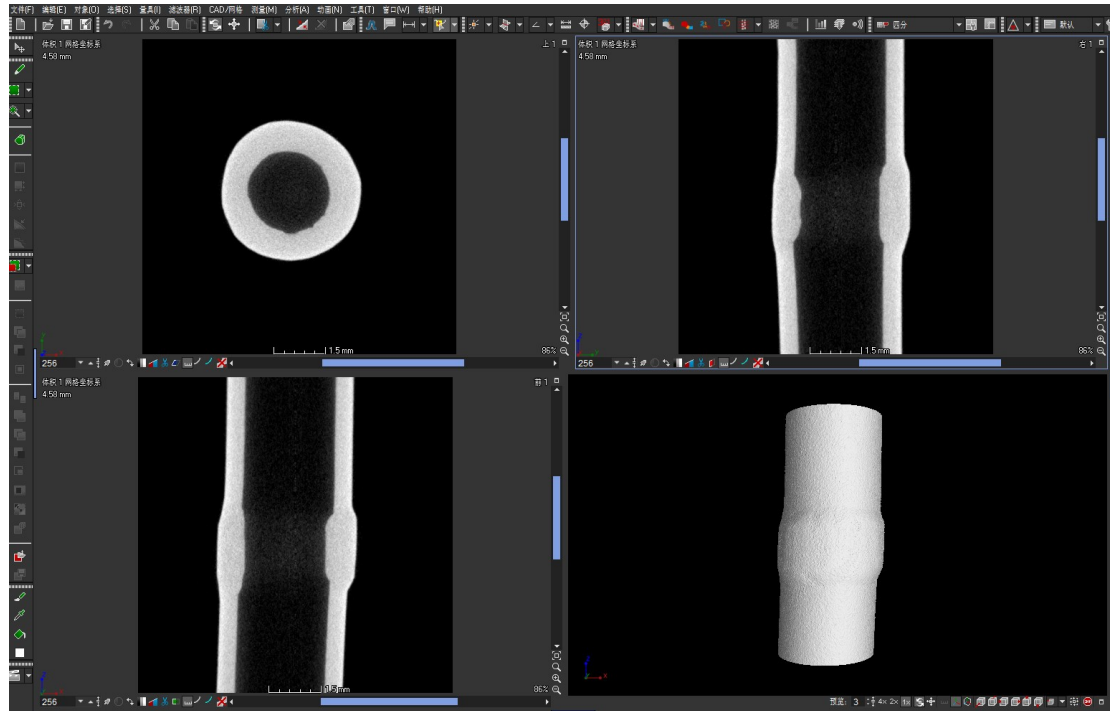
第 10 步：单击“下一步”。

第 11 步：单击“下一步”。

第 12 步：单击“下一步”。



第 13 步：查看重建图像。



5 实验任务

- (1) 给定工件，完成指定角度范围(如 360 度)内的锥束投影图像数据采集。
- (2) 针对投影图像数据，进行锥束 CT 重建。
- (3) 分析 CT 图像特点。
- (4) 完成实验报告。