

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209898

复合扫描计算机分层成像研究*

周鹏伍^{1,2}, 席雅睿^{2,3}, 朱国荣^{2,3}, 袁 伟^{2,3}, 刘丰林^{1,2,3}

(1. 重庆大学机械与运载工程学院 重庆 400044; 2. 重庆大学工业 CT 无损检测教育部工程研究中心 重庆 400044;
3. 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室 重庆 400044)

摘 要:针对薄板类工件成像, 计算机分层成像 (CL) 技术因无损、直观而应用广泛。CL 成像方法主要分为直线扫描和圆周扫描, 直线扫描效率高, 圆周扫描数据均匀性好。然而, 由于两者的投影数据均不完备, 均存在分层图像混叠及图像边缘不清的问题。基于此, 提出了一种复合扫描 CL (HyCL) 成像方法, 由直线扫描和圆周扫描组成。建立了几何模型, 采用同时迭代重建图像 (SIRT) 算法进行了仿真及成像实验, 分析了成像效果及层间混叠表现。实验结果表明, 相比于相对平行直线移动扫描 CL (PTCL)、正交直线移动扫描 CL (OTCL) 及圆周扫描 CL (RCL), HyCL 的重建结果能够有效减少混叠伪影, 图像特征轮廓信息能够保留得较为清晰且均匀, 对比度更好。

关键词: 计算机分层成像; 直线扫描; 圆周扫描; 复合扫描; 图像重建

中图分类号: TP391 TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Research on the hybrid scanning computed laminography

Zhou Pengwu^{1,2}, Xi Yarui^{2,3}, Zhu Guorong^{2,3}, Yuan Wei^{2,3}, Liu Fenglin^{1,2,3}

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Engineering Research Center of Industrial Computed Tomography Nondestructive Testing, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: For the imaging of plate-like objects, the computed laminography (CL) technology has been widely used because of its nondestructive and intuitive characteristics. CL imaging methods are mainly divided into linear scanning and circular scanning. Linear scanning has high efficiency, and circular scanning has good data uniformity. However, due to the incomplete projection data of both methods, there are problems of sliced image aliasing and unclear image edge. In this article, a hybrid scanning CL (HyCL) imaging method is proposed, which consists of linear scanning and circular scanning. The geometric model is formulated, the simulation and imaging experiments are implemented by using SIRT image reconstruction algorithm, the imaging effect and in-slice aliasing is analyzed. Compared with parallel translation computed laminography (PTCL), orthogonal translation computed laminography (OTCL) and rotational computed laminography (RCL), results show that HyCL can effectively reduce aliasing artifacts and protect details. The image contour can be retained clearly and evenly, and the contrast is better.

Keywords: computed laminography; linear scanning; circular scanning; hybrid scanning; image reconstruction

0 引 言

计算机分层成像技术 (computed laminography, CL) 是一种基于 X 射线透射, 获取穿过检测对象后的射线

衰减分布信息的成像技术, 具有无损且直观的优点。传统计算机断层成像 (computed tomography, CT) 技术需要采集检测对象不同分度方向的射线投影数据, 适合于近似圆柱形的物体扫描成像。对于板状部件/结构的检测, 物体的纵向和横向尺寸差异大, 射线穿过被

扫描物体的路径长度在不同角度下变化大,扫描成像难度较大。由于 CL 扫描物体回转直径不垂直于中心射线方向,而是形成小于 90° 的夹角,能有效改善射线穿透厚度的限制,可通过增加成像几何放大比在一定程度上提高空间分辨能力。因此,针对长宽尺寸远大于厚度尺寸的薄板类物体射线检测,CL 技术具备优势且应用广泛^[1-3]。

经典分层成像法^[4]受硬件条件限制,只能对焦平面层成像。随着数字探测器的出现,经典分层成像法发展成为 CL 技术。近年来,对特定板状结构工件的检测精度需求逐渐提升,多种 CL 成像方法被提出^[5-6],其中以直线型和圆周型扫描方式应用较为广泛。1996 年,Zhou 等^[7]开发了一种针对大型板状物体射线检测的线型 CL 系统,经测量能达到 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的切片分辨力。2010 年,Fu 等^[8]提出一种大视野非对称旋转扫描结构的 CL 系统,该系统可拓展成像区域以及提高成像空间分辨力。2011 年,Helfen 等^[9]提出一种基于中子衰减的 CL 扫描系统,对密度相近的有机材料和塑料能够较好地区分。2015 年,Liu 等^[10]开发出一种工业计算机分层成像系统(industrial computed laminography, ICL)系统,该系统结合 C 形臂结构,能灵活调节感兴趣区域(region of interest, ROI)和成像视场大小。2018 年,王少宇等^[11]提出一种相对平行直线移动扫描 CL(parallel translation computed laminography, PTCL)系统,以芯片为检测对象,结合了 FDK 解析重建算法和基于图像 TV 最小化的联合代数重建技术(SART+TV),证明该系统可以实现基于截断投影数据的高质量图像重建。在此基础上,田忠建等^[12]提出正交直线平移扫描 CL(orthogonal translation computed laminography, OTCL)系统,结合仿真和扫描实验,与 PTCL 相比,证明了在相同扫描角度下 OTCL 在横向的两个方向上都具备较高的图像分辨力。总之,直线扫描 CL 结构简单、扫描效率高且容易获得较高放大比;圆周扫描 CL(RCL)覆盖角度大、投影数据均匀性好,但相对而言结构较复杂、放大比较低。由于直线扫描 CL 和圆周扫描 CL 的投影数据均不完备,存在分层图像混叠及图像边缘不清晰的问题。

为此,本文尝试研究一种直线-圆周复合扫描 CL(hybrid scanning CL, HyCL)成像方法,先进行直线扫描,射线源和探测器相对于检测对象做相对平行直线移动,采集投影数据;接着进行圆周扫描,射线源和探测器相对于检测对象做圆周运动,采集投影数据。通过将直线扫描和圆周扫描结合,期望能够获得兼具直线扫描 CL 和圆周扫描 CL 的分层成像效果。

1 HyCL 成像模型及图像重建方法

1.1 投影分布

由于扫描方式不同,对应投影区域的分布也不同。相同扫描角度 θ 下,PTCL、OTCL、RCL 及 HyCL 的投影分布如图 1 所示。从图 1(a)、(b)可以看出,由于 PTCL 和 OTCL 都是直线型 CL,其投影分布形态相似,但 OTCL 是正交方向上的 PTCL,故其投影分布更广。从图 1(c)可以看出,RCL 的投影分布与直线型 CL 明显不同,显得更为均匀。观察图 1(d)可知,通过结合 PTCL 和 RCL 的投影分布,能够一定程度上进行数据互补,从而得到 HyCL 的投影分布。

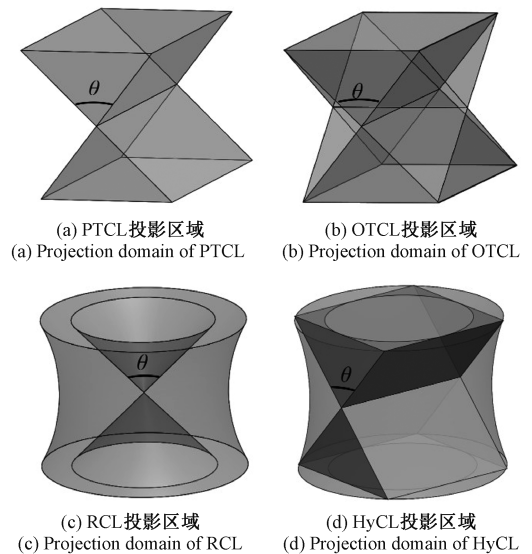


图 1 各成像方法投影区域分布

Fig. 1 Projection domain of each imaging method

1.2 几何模型

图 2(a)和(b)所示为 HyCL 扫描运动示意图。射线源位于检测对象下方,向上发出锥束 X 射线;平板探测器位于检测对象上方,接收穿过检测对象后衰减的 X 射线。扫描过程分为两步。1) 相对平行直线扫描运动;2) 圆周扫描运动。图 2(c)和(d)所示为 HyCL 扫描二维几何模型。 S 代表射线源, D 代表探测器, S_0 为射线源-检测对象距离, S_d 为射线源-探测器距离。 k 为扫描几何放大比, $k = S_d/S_0$ 。

直线扫描时,检测对象静止,射线源、探测器沿 y 方向运动采集数据。当扫描角度 α 确定,射线源的运动总行程 P_s 及探测器运动总行程 P_d 为:

$$P_s = 2 \cdot S_0 \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \quad (1)$$

$$P_d = 2 \cdot (S_d - S_0) \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

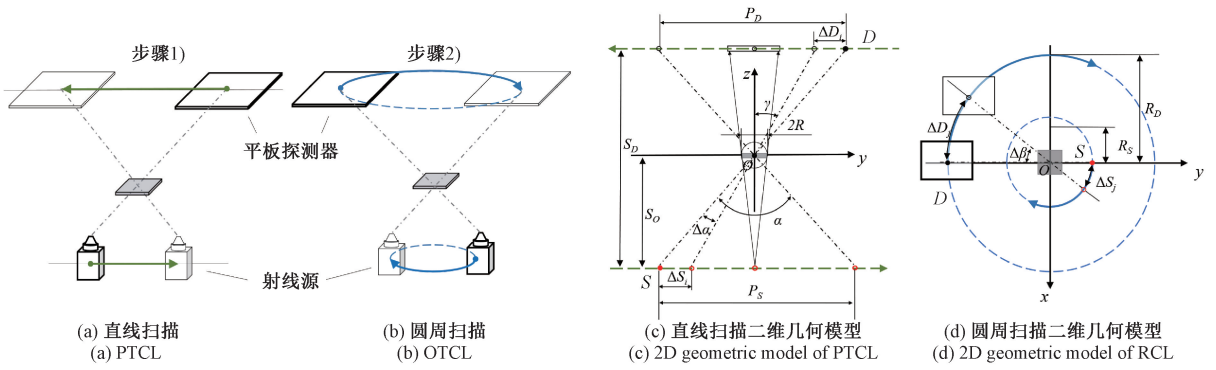


图2 HyCL 扫描示意图及几何模型

Fig. 2 The motion sketch and 2D geometric model of HyCL scanning

数据采集方式有等距采样和等角采样两种。等距采样,即前后采样点射线源、探测器步进距离保持定值;等角采样,即前后采样点等效扫描角度差 $\Delta\alpha$ 不变。等距采样对设备的运动控制性能要求较低,但所获取的数据均匀性稍差,故本文直线扫描采用等角采样。直线扫描采样点数为 p ,则 $\Delta\alpha = \alpha/p$ 。射线源步进距离 ΔS_i 及探测器的步进距离 ΔD_i 为:

$$\Delta S_i = \frac{1}{2} \cdot P_s - S_o \cdot \tan(\alpha - i \cdot \Delta\alpha) \quad (3)$$

$$\Delta D_i = \frac{1}{2} \cdot P_d - (S_d - S_o) \cdot \tan(\alpha - i \cdot \Delta\alpha) \quad (4)$$

式中: $i = 1, \dots, p$, 代表采样点位置。 R 为系统成像视场半径, γ 为中心射线与边缘射线的夹角, $R = S_o \cdot \tan\gamma$ 。

圆周扫描时,检测对象静止,射线源、探测器绕 z 轴做 360° 圆周运动采集数据。射线源运动轨迹半径 R_s 和探测器运动轨迹 R_d 半径分别为:

$$R_s = S_o \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \quad (5)$$

$$R_d = (S_d - S_o) \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \quad (6)$$

数据采集方式仍为等角采样,圆周扫描采样点数为 q ,则射线源、探测器的圆周运动分度为 $\Delta\beta = 2\pi/q$,进一步地,射线源步进距离 ΔS_j 及探测器步进距离 ΔD_j 为:

$$\Delta S_j = R_s \cdot \Delta\beta \quad (7)$$

$$\Delta D_j = R_d \cdot \Delta\beta \quad (8)$$

在本文所提 HyCL 成像方法中,圆周扫描在直线扫描后连续进行。

1.3 图像重建算法

与 CT 图像重建算法类似,CL 图像重建算法也可分为解析法和迭代法。解析类重建算法^[13-15]重建速度快、可靠高,但混叠伪影对图像质量的影响较大。而迭代类重建算法^[16-17]能够从缺失、低信噪比的数据中良好地重建图像。相较于 PTCL 和 OTCL,HyCL 获取的投影数据

分布更广,但其投影数据仍不完备,不满足 Tuy 精确重建条件^[18]。为获取更高精度的重建图像,本文采用同时迭代重建技术(simultaneous iterative reconstruction technique, SIRT)^[19]迭代重建算法验证直线-圆周组合扫描成像方法的有效性。CL 成像模型可定义为:

$$AX = B \quad (9)$$

式中: $B = (b^1, b^2, \dots, b^M) \in \mathbf{R}^M$ 为投影数据, M 为射线总数; $X = (x^1, \dots, x^N) \in \mathbf{R}^N$ 为重建图像, N 为像素总数; $A = [a_{ij}]$ 是系统矩阵, $i = 1, \dots, M$, M 为射线总数, $j = 1, \dots, N$, N 为像素总数。SIRT 迭代表达式为:

$$x_j^{k+1} = x_j^k + \lambda^k \frac{1}{\sum_{i=1}^M a_{ij}} \sum_{i=1}^M \frac{p_i - \tilde{p}_i}{\sum_{j=1}^N a_{ij}^2} a_{ij} \quad (10)$$

式中: $\lambda^k \in (0, 2)$ 是松弛因子,用于抑制过度修正, k 为迭代次数; p_i 为第 i 条射线的投影值; $\tilde{p}_i$ 是第 i 条射线的估计值; a_{ij} 是投影系数(系统矩阵内的元素),反映第 j 个体素对第 i 条射线的贡献。SIRT 利用全部角度下所有射线通过某体素共同产生的矫正项来降低数据不一致性的影响,从而实现图像重建。

1.4 定量指标评价

本文采用均方根误差 R_{MSE} 以及结构相似度 S_{SIM} 对重建图像质量进行定量评价。其中, R_{MSE} 定义为:

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - f_i)^2}{n}} \quad (11)$$

式中: $x_i \in X$, 代表真值图像 X 的像素灰度值; $f_i \in F$, 代表重建图像 F 的像素灰度值; n 为像素点数。 S_{SIM} 定义为:

$$S_{SIM}(X, F) = \frac{(2\mu_X \mu_F + c_1)(2\sigma_{XF} + c_2)}{(\mu_X^2 + \mu_F^2 + c_1)(\sigma_X^2 + \sigma_F^2 + c_2)} \quad (12)$$

式中: μ_X 和 μ_F 为像素灰度平均值; σ_X^2 和 σ_F^2 为像素灰度值方差; σ_{XF} 为二者协方差; $c_1 = (m_1 P)^2$, $c_2 = (m_2 P)^2$ 是维持稳定的常数, P 是像素的动态范围。经验取值^[20] 为

$m_1 = 0.01, m_2 = 0.03$ 。一般地, R_{MSE} 越小、 S_{SIM} 越大, 图像质量越好。

2 实 验

2.1 仿真实验

为探究 HyCL 的成像效果, 设计了多层模拟电路板模体, 如图 3 所示, 具有 3 种不同的制式, 大小为 $350 \times 350 \times 100$ 。模体在分层方向上共 100 层, 其中第 37~40 层、第 49~52 层和第 61~64 层切片结构分别为制式 1、制式 2 和制式 3, 其余层数据为 0。分别采用 PTCL、OTCL、RCL 及 HyCL 对模拟电路板进行成像, 仿真参数如表 1 所示。

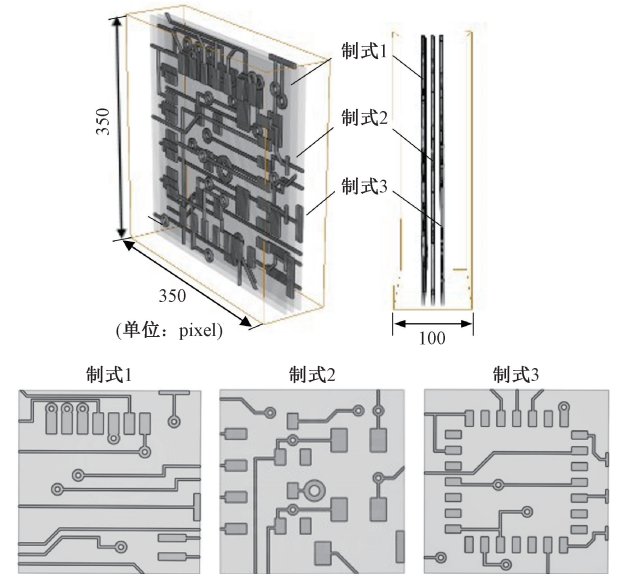


图 3 电路板模体
Fig. 3 PCB phantom

表 1 电路板仿真参数

Table 1 Parameters of PCB simulation	
实验参数	数值
X 射线源-检测对象距离 S_0/mm	100
X 射线源-探测器距离 S_D/mm	240
探测器像素尺寸/mm	0.085×0.085
扫描角度 $\alpha/(\text{°})$	90
PTCL 投影分度数	101
OTCL 投影分度数	202
RCL 投影分度数	360
HyCL 投影分度数	461
重建算法	SIRT
迭代次数	300
重建矩阵	350×350×100

图 4 所示为各特征层的二维重建结果。观察整图, 和真值图像相比, PTCL 重建结果具有较严重的混叠伪影, 特征边缘较为模糊, 图像质量较差; OTCL 重建结果基本恢复图像, 特征边缘清晰, 但如红色箭头所示, 仍明显存在混叠伪影; 而 RCL 和 HyCL 重建结果不仅较好地恢复图像特征, 同时混叠伪影明显减少。进一步比较 ROI 部分重建结果图, 相较于 PTCL 和 OTCL, RCL 和 HyCL 对于圆环特征重建效果更优, 混叠伪影更少; 同时如箭头所示, 对于圆环特征的边缘, HyCL 的重建效果比 RCL 更精确。

为进一步评估所提 HyCL 成像方法的重建效果, 取图 4 横向切片的一维剖线(虚线)进行对比, 结果如图 5 所示。在不同特征层的重建结果中, 相比于真值, 在灰度值不变的范围内, PTCL 和 OTCL 的重建结果具有明显跳动现象, 而 RCL 和 HyCL 能够较好地贴近真值; 在灰度值突变处, 观察方框标识, 经过放大可以发现, HyCL 的重建结果更为接近真值。

为客观评价几种成像方法的重建图像质量, 计算图 4 横向切片的 R_{MSE} 和 S_{SIM} , 结果如表 2 所示。对比 R_{MSE} , HyCL 的结果最小, 说明其重建图像在数值上最接近于真值图像; 对比 S_{SIM} , HyCL 的结果最大, 说明其重建结果与真值图像具有更高的相似度。综合来看, 定量指标说明了 HyCL 的重建效果更好。

仿真实验结果说明, 在相同扫描角度的情况下, PTCL 和 OTCL 的重建结果整体存在明显混叠伪影, 而 RCL 和 HyCL 能够有效减少重建图像中的混叠伪影, 使得重建图像具备较好的对比度。针对感兴趣层图像特征和边缘信息的还原, HyCL 较好, RCL 次之, PTCL 和 OTCL 稍差。这里的感兴趣层是指在三维体数据中我们所关注的结构特征所在的某一层或某几层。在本节仿真实验中, 感兴趣层即为 3 种不同制式的切片结构所在的第 37~40 层、第 49~52 层、第 61~64 层。

2.2 扫描实验

1) 实验系统

为验证 HyCL 的实际成像效果, 进行了扫描成像实验。图 6(a) 所示为系统照片, 实验系统基本组成为射线源-平板探测器、机械运动与控制驱动系统等。其中, 射线源与平板探测器是扫描成像的主要装置; 机械系统是整个扫描实验平台的承载框架; 控制与驱动系统实现射线源-检测对象-探测器的空间移动, 采集不同扫描方式下的数据; 运动控制、数据采集指令由计算机系统发出。

为便于实现圆周扫描, 设计其扫描方式为射线源、探测器位于直线扫描终点处静止, 检测对象由转台带动旋转从而获取投影数据。此扫描方式的几何模型与第 2 节所提圆周扫描几何模型一致, 两者效果等同。射线源

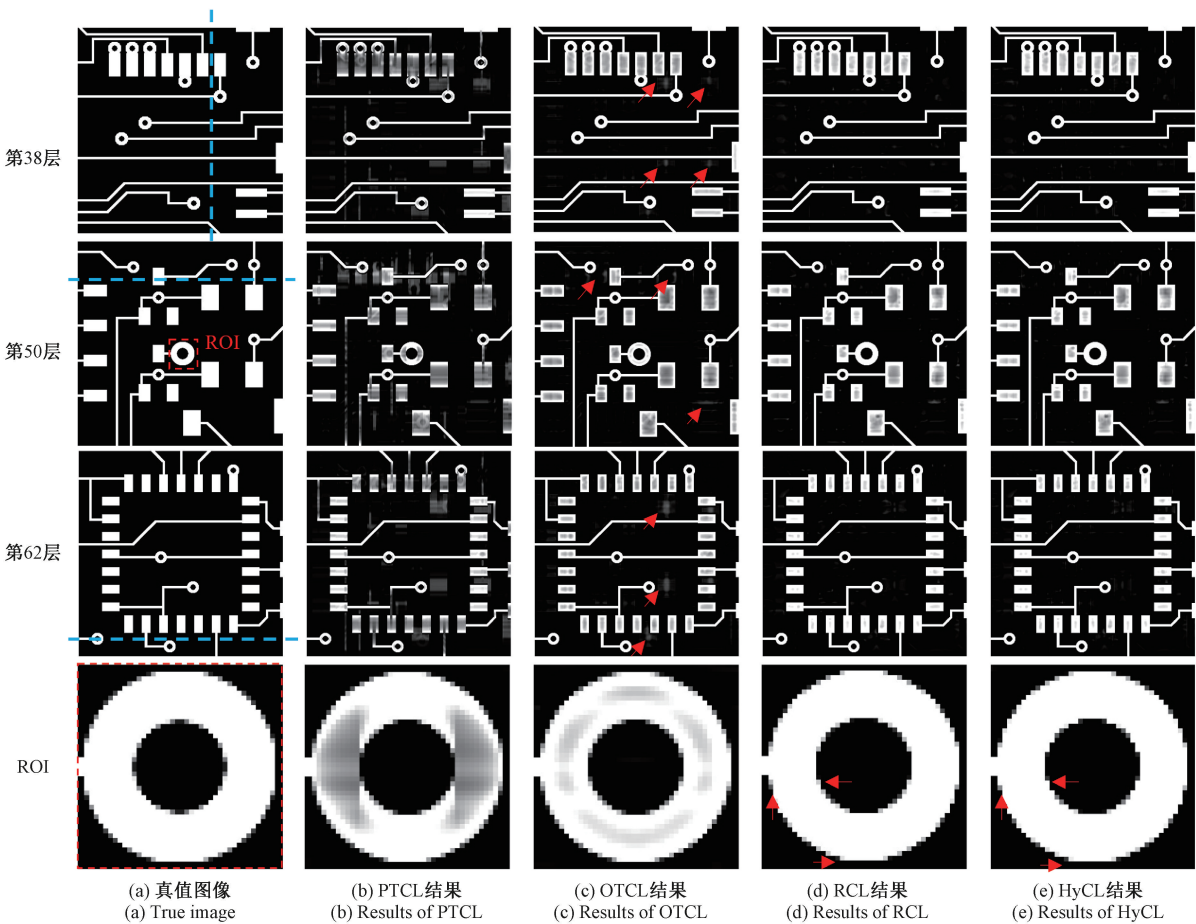


图 4 不同成像方法下仿真结果的不同特征层横向切片,显示窗口[0 102]

Fig.4 Different horizontal slices of simulation results using different imaging methods with the display window [0 102]

表 2 不同成像方法下仿真结果的不同特征层水平切片 R_{MSE} 及 S_{SIM}
Table 2 R_{MSE} and S_{SIM} of different horizontal slices of simulation
results using different imaging methods

切片	第 38 层		第 50 层		第 62 层	
	R_{MSE}	S_{SIM}	R_{MSE}	S_{SIM}	R_{MSE}	S_{SIM}
PTCL	55.527 1	0.602 9	67.983 9	0.475 4	58.756 3	0.571 2
OTCL	45.795 6	0.661 1	56.919 0	0.508 1	48.841 8	0.663 1
RCL	37.968 7	0.696 1	50.054 2	0.639 1	40.621 0	0.691 3
HyCL	37.793 6	0.713 1	50.003 7	0.659 2	40.425 7	0.704 6

安装在转台下方,向上发出锥束 X 射线,具有 M1 和 M2 两个方向的自由度,在 M1 方向运动可调节 S_o 和 S_p ,在 M2 方向上运动以配合探测器实现直线扫描;检测对象置于转台中心,转台具有 M3 方向的旋转自由度,以实现圆周扫描;探测器安装在转台上方,接收经过检测对象衰减后的 X 射线,具有 M4 和 M5 两个方向的平移自由度,在 M4 方向上运动以配合射线源实现直线扫描,在 M5 方向上运动可调节 S_D 。

数据采集前,需要确定扫描角度 α 和采样点数 p, q 。将检测对象置于转台中心,首先进行直线扫描,检测对象静止,射线源、探测器分别沿 M2、M4 方向进行相对平行直线移动;然后进行圆周扫描,射线源、探测器静止于直线扫描结束位置,检测对象位于转台中心沿 M3 方向进行 360°圆周运动。

2) 实验结果

由上述所搭建的实验系统进行扫描实验,采用日本

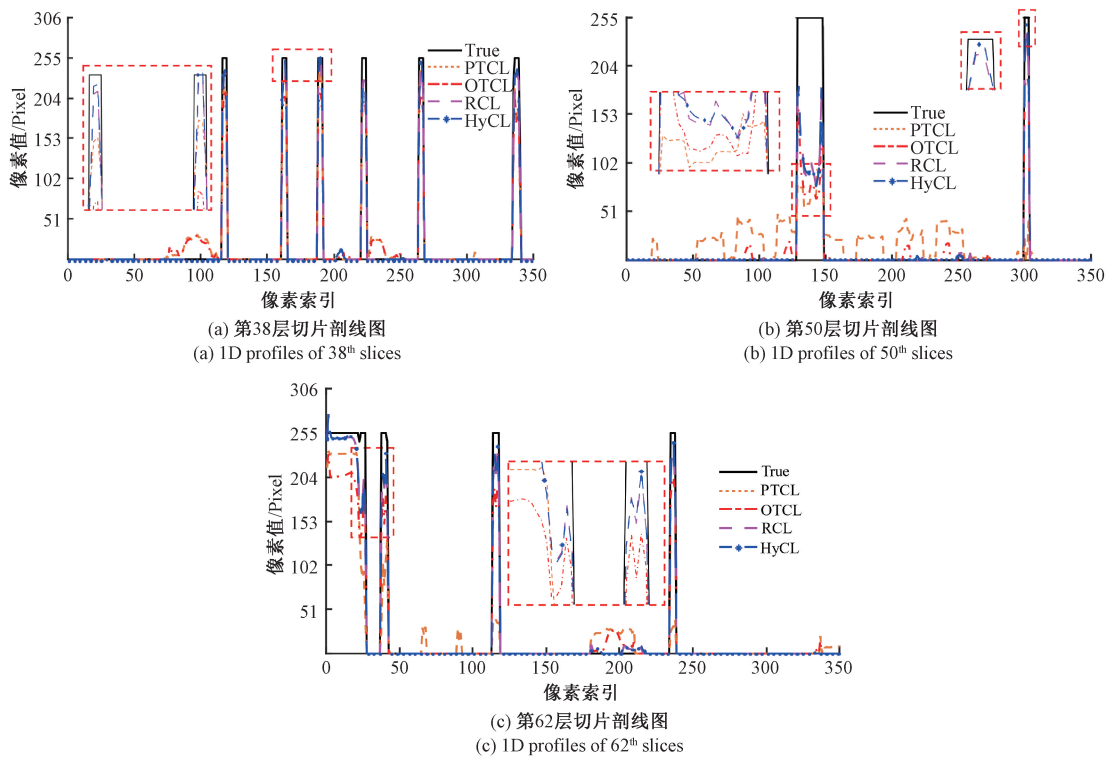


图 5 不同成像方法下仿真结果第 38、50 及 62 层横向切片蓝色虚线处的一维剖线图
Fig. 5 The 1D profiles at the blue dotted lines of the 38th, 50th and 62th horizontal slices of simulation results using different imaging methods

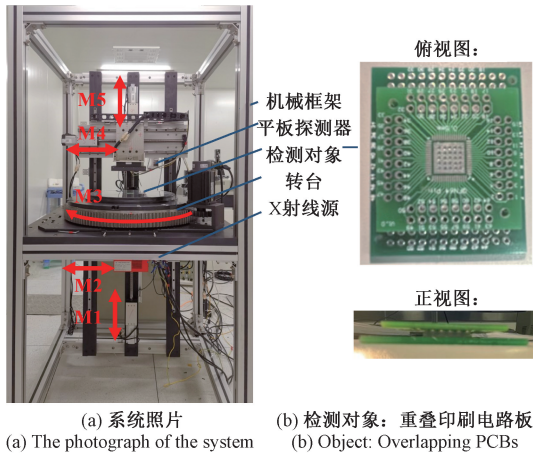


图 6 实验系统及检测对象
Fig. 6 Experimental system and object

滨松 L10321 型微焦点射线源, X 射线锥角为 118° , 设置射线源管电压为 70 kV, 管电流为 $90\text{ }\mu\text{A}$ 。采用奕瑞 NDT0505J 型平板探测器, 像元尺寸为 $85\text{ }\mu\text{m}\times 85\text{ }\mu\text{m}$, 像元矩阵为 $1\text{ }536\times 1\text{ }536$ 。 $S_0=100\text{ mm}$, $S_D=180\text{ mm}$, 扫描角度 $\alpha=90^{\circ}$ 。采用 SIRT 算法迭代 100 次, 重建矩阵为 $512\times 512\times 200$ 。其余参数与仿真实验相同。分别采用 PTCL、OTCL、RCL 以及 HyCL 4 种成像方法, 检测对象为

双层印刷电路板, 如图 6(b) 所示。
不同成像方法下扫描实验结果如图 7、8 所示。观察第 75 层、第 115 层切片整图可以看出, 相比 PTCL 和 OTCL, RCL 和 HyCL 能够很好地抑制混叠伪影, 图像具备较好对比度。观察 ROI I、ROI II 及 ROI III, PTCL 和 OTCL 对于线条类特征的复原稍好, 但对于圆环状特征的复原存在结构拖尾; RCL 对图像特征的复原相对均匀, 但图像清晰度有所欠缺; 相比之下, HyCL 在清晰度和均匀性上都表现良好。

3 讨 论

针对薄板类工件内部结构及缺陷检测, CL 技术是一种理想扫描方式。直线型 CL 具有扫描速度快, 横向分辨率较高等优势; 圆周型 CL 虽然结构复杂, 但因扫描焦距不变, 投影数据更均匀。本文提出的 HyCL 成像方法, 在扫描速度上, 由于引入 RCL, HyCL 不具备明显优势, 但是其投影数据等同于直线型 CL 与圆周型 CL 的组合, 分布更为广泛, 因而对于投影数据缺失导致的混叠伪影, HyCL 会有较好的抑制作用。层间混叠现象的一个突出表现为: 在感兴趣层切片中出现其余切片层的特征, 使得感兴趣层的图像对比度降低。为清楚地展示 4 种成像

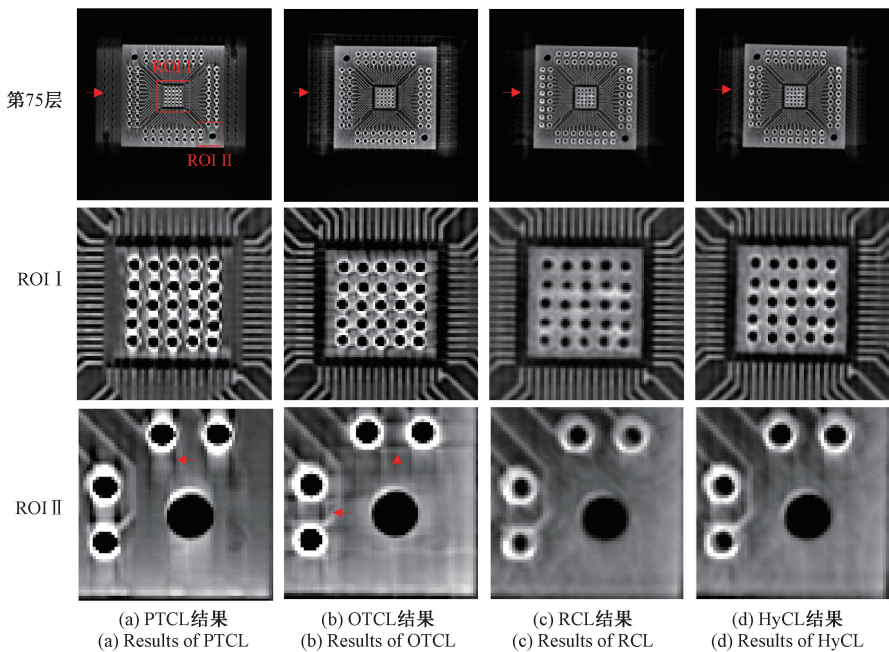


图 7 不同成像方法下扫描实验结果第 75 层横向切片,显示窗口[0 0.03]

Fig. 7 75th horizontal slices of experimental results using different imaging methods with the display window [0 0.03]

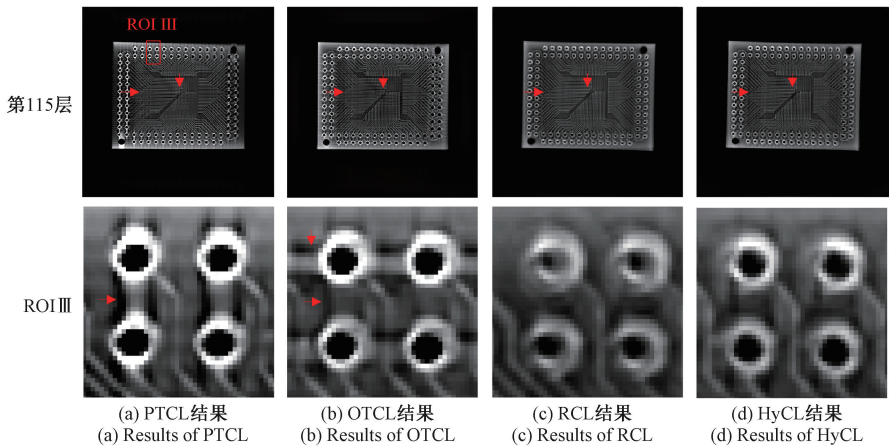


图 8 不同成像方法下扫描实验结果第 115 层横向切片,显示窗口[0 0.03]

Fig. 8 115th horizontal slices of experimental results using different imaging methods with the display window [0 0.03]

方法在该现象上的表现,如图 9 所示,取上一章电路板仿真实验结果的第 20、25、30 层横向切片(真值为空气层)进行说明。理论上对于不同切片层而言,离特征层越近,其混叠伪影的影响越大。比较混叠伪影对于不同层的影响:PTCL 的层间混叠较为严重;比较第 30 层,OTCL、RCL 和 HyCL 混叠伪影特征类似,但 OTCL 混叠伪影影响相对较大;比较第 25 层,OTCL 混叠伪影仍然比较明显,RCL 与 HyCL 视觉效果相当,混叠伪影明显减少;在第 20 层的时候,OTCL 与 RCL 仍有少量混叠伪影,HyCL 混叠伪影几乎消失。

进一步剖析层间混叠现象的表现,为便于观察,采用了图像特征较为简单的圆盘模体进行仿真实验,实验参

数与第 2 节仿真实验参数保持一致。模体由 3 个制式圆盘重叠而成,如图 10 所示。

圆盘仿真结果如图 11 所示。可以直观看出,在纵向上由于切片间混叠导致特征边缘模糊从而呈现类似边缘信息扩散的现象,正是横向切片内存在混叠伪影的原因。方框和箭头区域不仅导致非感兴趣层的特征出现在感兴趣层上,同时在感兴趣层上还会出现不均匀的灰度值梯度变化。具体观察 4 种成像方法的重建结果,PTCL 和 OTCL 在纵向上均较难识别一些跨圆盘的边缘特征,故在横向切片内具有明显混叠伪影;而 RCL 和 HyCL 尽管不够清晰,但能够看到一些跨圆盘特征边缘的存在,故在横向切片内,RCL 和 HyCL 的混叠伪影相对较少。再者,

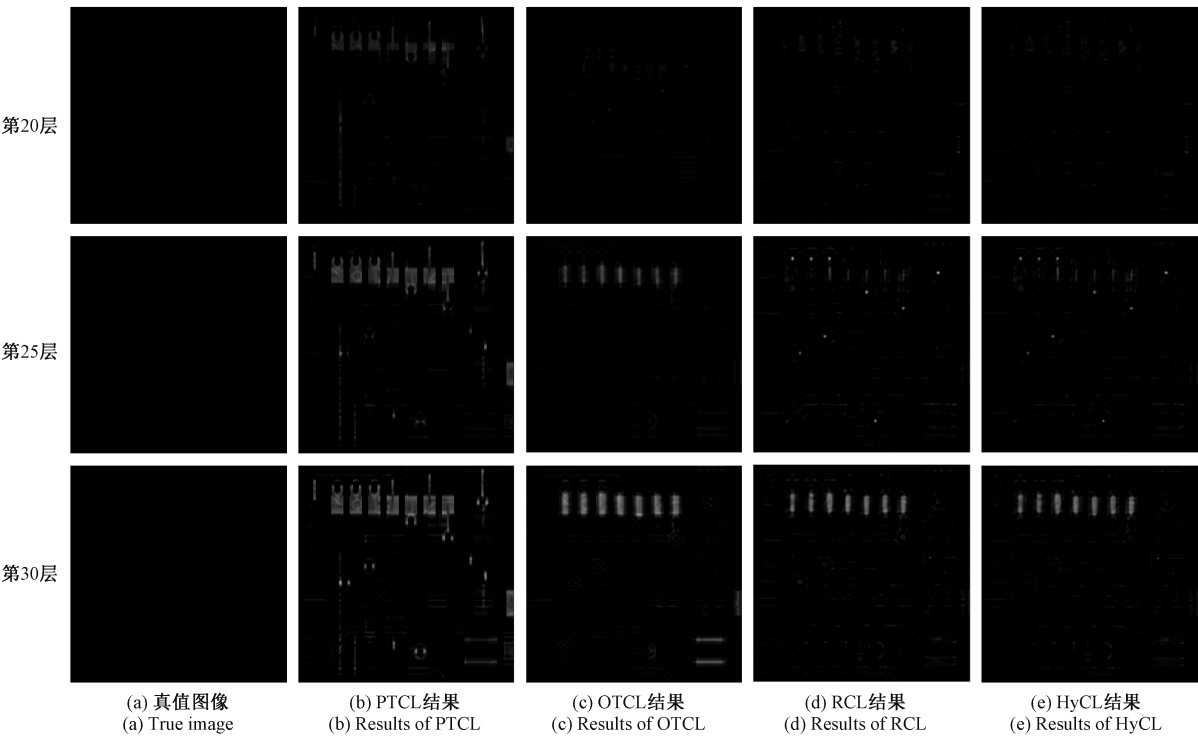


图 9 电路板仿真结果第 20、25、30 层横向切片,显示窗口[0 102]

Fig. 9 20th, 25th, and 30th horizontal slices of simulation results of the PCB with the display window [0 102]

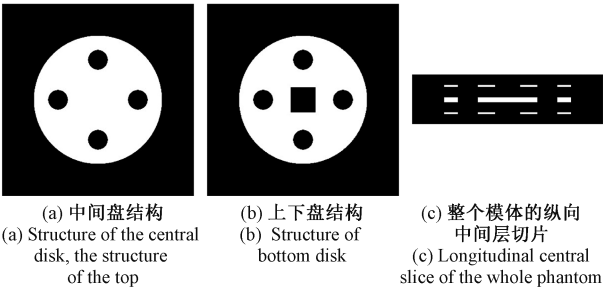


图 10 圆盘模体结构

Fig. 10 The structure of the disk phantom

观察 RCL 和 HyCL 纵向切片,可以看到 HyCL 在圆盘内灰度不均的现象相对于 RCL 有所改善,结合第 2 节仿真及扫描实验结果,这也可能成为 HyCL 在横向切片内的重建清晰度优于 RCL 的原因,但仍待论证。CL 扫描角度一般在 $90^{\circ} \sim 140^{\circ}$,由于实验条件限制,本文仿真实验和扫描实验的 CL 扫描角度均设置为 $\alpha = 90^{\circ}$ 。而对于不同扫描角度下的成像对比实验,将在后续进行。重建算法及扫描参数选择在一定程度上会影响重建效果。本文 SIRT 算法参数固定,各成像方法的扫描角度一致为 90° 、投影分度约为 1° ,我们在确保其余参数基本一致的

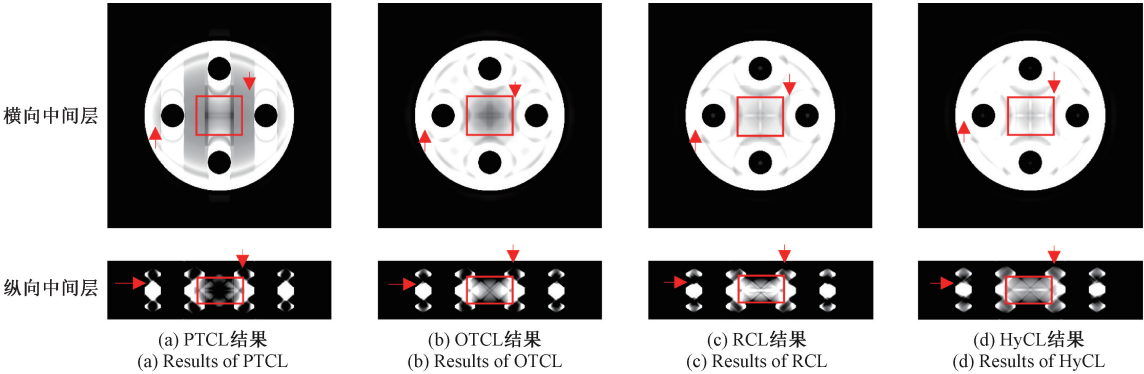


图 11 圆盘仿真结果横向中间层和纵向中间层切片,显示窗口[26 76]

Fig. 11 The horizontal and longitudinal central slices of simulation results of the disk with the display window [26 76]

情况下验证了 HyCL 成像方法的可行性。在实际实验中,圆周扫描采用检测对象旋转的方式,与射线源-探测器旋转相比,虽然二者成像几何模型等同,但在机械上,本文方式易于实现。

4 结 论

针对薄板类工件内部结构及缺陷检测,研究一种 HyCL 成像方法,先后采用相对平行直线扫描和圆周扫描获取投影数据。为了进一步说明 HyCL 成像方法的性能,本文采用多层印刷电路板,分别在理想投影数据和实际投影数据条件下进行实验。实验结果表明,在相同扫描角度下,相较于直线扫描 CL(PTCL、OTCL)和 RCL,通过投影数据的补充,HyCL 能够有效压制混叠伪影,其重建结果的特征边缘轮廓较为清晰且均匀,图像对比度较好。HyCL 成像方法能有效减少非感兴趣层特征对感兴趣层特征的混叠,但感兴趣层仍存在少量不均匀的灰度值梯度变化;针对感兴趣层图像特征和边缘信息的还原,HyCL 能达到较好结果,但在重建清晰度上相对于 PTCL 和 OTCL 还有待提升。基于此,后续将研究 HyCL 数据冗余处理、图像重建算法优化、结合深度学习的图像重建;以及不同投影角度的扫描成像对比。实际应用中,HyCL 成像可作为 CL 成像的补充,应用于高质量 CL 成像。

参考文献

- [1] CHEN Y, LIN N. Three-dimensional X-ray laminography and application in failure analysis for system in package (SiP) [C]. 14th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), IEEE, 2013:746-749.
- [2] FU J, ZHANG C S, ZHU G G, et al. Development and application of X-ray computed laminography for aerospace[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(14): 49-54.
- [3] KIM G, PARK S, PARK C, et al. Projection-based dual-energy digital tomosynthesis and its image characteristics [J]. Instrumentation Science and Technology, 2019, 47(3): 248-263.
- [4] TIGGELEN R V. Since 1895, orthopaedic surgery needs X-ray imaging: A historical overview from discovery to computed tomography [J]. Acta Orthopaedica Belgica, 2001, 67(4): 317-329.
- [5] O'BRIEN N S, BOARDMAN R P, SINCLAIR I, et al. Recent advances in X-ray cone-beam computed laminography [J]. Journal of X-Ray Science and Technology, 2016, 24(5): 691-707.
- [6] 蔡玉芳,李屏懿,王珏,等. 板壳结构物体计算机分

层成像检测技术研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 11-25.

CAI Y F, LI P Y, WANG J, et al. Recent advances in computed laminography for nondestructive testing of plate-shell objects [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(1): 11-25.

[7] ZHOU J, MAISL M, REITER H, et al. Computed laminography for materials testing [J]. Applied Physics Letters, 1996, 68(24): 3500-3502.

[8] FU J, JIANG B H, LI B. Large field of view computed laminography with the asymmetric rotational scanning geometry[J]. Science China (Technological Sciences), 2010, 53(8): 2261-2271.

[9] HELFEN L, XU F, SCHILLINGER B, et al. Neutron laminography-a novel approach to three-dimensional imaging of flat objects with neutrons [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2011, 651(1): 135-139.

[10] LIU B D, WEI Z H, WEI C F, et al. An industrial computed laminography imaging system [C]. Digital Industrial Radiology and Computed Tomography (DIR 2015), 2015.

[11] 王少宇,伍伟文,龚长城,等. 相对平行直线扫描计算机分层成像研究[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 144-155.

WANG SH Y, WU W W, GONG CH CH, et al. Study of parallel translation computed laminography imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 144-155.

[12] 田忠建,余海军,汪粼波,等. 正交直线扫描计算机分层成像研究[J]. 光学学报, 2020, 40(22): 97-106.

TIAN ZH J, YU H J, WANG L B, et al. Orthogonal translation computed laminography [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 97-106.

[13] 李雷,谭川东,廖明娟,等. 基于 Radon 逆变换的相对平行直线扫描 CT 解析重建[J]. 光学学报, 2021, 41(6): 118-129.

LI L, TAN CH D, LIAO M J, et al. Analytic reconstruction for parallel translational computed tomography based on radon inverse transform [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(6): 118-129.

[14] 蔡玉芳,李屏懿,王珏,等. 基于投影视角加权的直线 CL 重建算法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 64-74.

CAI Y F, LI P Y, WANG J, et al. Linear CL

- reconstruction algorithm based on projection view-weighting[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6): 64-74.
- [15] 李雷, 余海军, 谭川东, 等. 射线源平移扫描 CT 解析重建算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 187-195.
- LI L, YU H J, TAN CH D, et al. Analytical reconstruction algorithm of source translation based CT[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 187-195.
- [16] 雷德川, 陈浩, 王远, 等. 基于 CUDA 的多 GPU 加速 SART 迭代重建算法[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(9): 2418-2422.
- LEI D CH, CHEN H, WANG Y, et al. Accelerating simultaneous algebraic reconstruction technique by multi CUDA-enabled GPU[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(9): 2418-2422.
- [17] 贾统, 刘双全, 孙校丽, 等. CL 迭代重建算法的 GPU 实现[J]. 中国体视学与图像分析, 2020, 25(4): 393-400.
- JIA T, LIU SH Q, SUN X L, et al. GPU implementation of an iterative reconstruction algorithm for computed laminography [J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2020, 25(4): 393-400.
- [18] TUY H K. An inversion formula for cone-beam reconstruction [J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 1983, 43(3): 546-552.
- [19] ROY D, KRUGER R, YIH B, et al. Application of iterative reconstruction techniques to conventional circular tomography[C]. Application of Optical Instrumentation

in Medicine XIII. International Society for Optics and Photonics, 1985: 99-105.

- [20] ZHOU W, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity [J]. IEEE Trans Image Process, 2004, 13(4): 600-612.

作者简介



周鹏伍, 2020 年于西南石油大学获得学士学位, 现为重庆大学硕士研究生, 主要研究方向为工业 CL 技术与系统、CL 图像重建。

E-mail: pwzhou@cqu.edu.cn

Zhou Pengwu received his B.Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2020. He is currently a M. Sc. candidate at Chongqing University. His main research interests include ICL technology and system, and CL image reconstruction.



刘丰林 (通信作者), 分别在 1990 年、1993 年和 2009 年于重庆大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为重庆大学研究员、博士生导师, 主要研究方向为工业 CT/CL 技术与系统、能谱 CT。

E-mail: liufl@cqu.edu.cn

Liu Fenglin (Corresponding author) received his B.Sc. degree, M.Sc. degree, and Ph.D. degree all from Chongqing University in 1990, 1993, and 2009, respectively. He is currently a professor and a Ph.D. supervisor at Chongqing University. His main research interests include ICT/ICL technology and systems, and spectral CT.