

8-13-2020

## Design and Simulation of Regional Differently Filtering Method of FBP Algorithm for Multilayer Spherical Shell

Jingtao Xia

*State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect(Northwest Institute of Nuclear Technology), Xi'an 710024, China;*

Qunshu Wang

*State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect(Northwest Institute of Nuclear Technology), Xi'an 710024, China;*

Jiming Ma

*State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect(Northwest Institute of Nuclear Technology), Xi'an 710024, China;*

Hei Dongwei

*State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect(Northwest Institute of Nuclear Technology), Xi'an 710024, China;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Design and Simulation of Regional Differently Filtering Method of FBP Algorithm for Multilayer Spherical Shell

## Abstract

**Abstract:** Aiming at the CT detection technology research for multilayer spherical shell with great density difference, the parallel beam CT projection and image reconstruction system model were built and a software platform was developed. Combined with theoretical analysis and computer simulation, the filtering method of FBP theory for image reconstruction was focused on. *A special scanning mode was limited to make the projection sinogram of multilayer spherical shell show a regional spatial distribution, which was divided up combined with image analysis and priori knowledge. Then, according to the frequency characteristic and reconstruction demand, RL and SL functions were respectively used to filter projection data of different regions.* The simulation results show that the proposed method can obtain better image reconstruction results compared with the single function filter in the traditional FBP algorithm.

## Keywords

CT, filter back projection, image reconstruction, multilayer sphere, simulation

## Authors

Jingtao Xia, Qunshu Wang, Jiming Ma, Hei Dongwei, Sheng Liang, Fuli Wei, and Guzhou Song

## Recommended Citation

Xia Jingtao, Wang Qunshu, Ma Jiming, Hei Dongwei, Sheng Liang, Wei Fuli, Song Guzhou. Design and Simulation of Regional Differently Filtering Method of FBP Algorithm for Multilayer Spherical Shell[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(12): 3061-3066.

# 多层球壳构件 FBP 重建差异化滤波设计与仿真

夏惊涛, 王群书, 马继明, 黑东炜, 盛亮, 魏福利, 宋顾周

(强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室(西北核技术研究所), 陕西 西安 710024)

**摘要:** 针对高密度差多层球壳这一类特殊工件的 CT 检测技术研究, 构建平行束 CT 投影及图像重建系统模型, 开发建立 CT 研究软件平台, 结合理论分析和仿真着重研究基于滤波反投影(FBP)理论重建图像的滤波处理方法。首先通过限定扫描方式使多层球壳截面的 CT 投影正弦图呈现空间区域性分布, 结合图像分析和先验知识对其进行分割, 再根据重建细节的频率特征和检测需求, 对不同区域投影分别采用 RL 和 SL 函数进行针对性的滤波处理。仿真结果表明, 相对于传统 FBP 算法中的单一函数滤波, 所提出的分区域差异化滤波方法能够获得更好的图像重建效果。

**关键词:** CT; 滤波反投影; 图像重建; 多层球壳; 仿真

中图分类号: TP391.7 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 12-3061-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201611026

## Design and Simulation of Regional Differently Filtering Method of FBP Algorithm for Multilayer Spherical Shell

Xia Jingtao, Wang Qunshu, Ma Jiming, Hei Dongwei, Sheng Liang, Wei Fuli, Song Guzhou

(State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect(Northwest Institute of Nuclear Technology), Xi'an 710024, China)

**Abstract:** Aiming at the CT detection technology research for multilayer spherical shell with great density difference, the parallel beam CT projection and image reconstruction system model were built and a software platform was developed. Combined with theoretical analysis and computer simulation, the filtering method of FBP theory for image reconstruction was focused on. A special scanning mode was limited to make the projection sinogram of multilayer spherical shell show a regional spatial distribution, which was divided up combined with image analysis and priori knowledge. Then, according to the frequency characteristic and reconstruction demand, RL and SL functions were respectively used to filter projection data of different regions. The simulation results show that the proposed method can obtain better image reconstruction results compared with the single function filter in the traditional FBP algorithm.

**Keywords:** CT; filter back projection; image reconstruction; multilayer sphere; simulation

## 引言

在工业领域有一类特殊构件, 如图 1 所示, 其



收稿日期: 2015-03-30 修回日期: 2015-05-11;  
基金项目: 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室  
预研基金(SKLIPR14017);  
作者简介: 夏惊涛(1981-), 男, 湖北荆州, 博士, 高  
工, 研究方向为辐射成像技术。

总体结构为尺寸较大的多层球壳, 层内为均匀分布的同种材料, 层间材料不同且密度差异达到数十倍, 高密度材料位于球壳内层, 外围为低密度材料。其各向截面除两端为单一材料的二维圆形结构外, 其它均为多层环状结构分布, 针对此类工件开展高精度 CT(Computerized Tomography)无损检测技术研究具有现实需求<sup>[1]</sup>。

滤波反投影(Filter Back Projection, FBP)是当前

实际 CT 装置中应用最多的重建算法, 其关键环节之一是对扫描得到的射线投影数据进行滤波<sup>[2-3]</sup>。传统 FBP 算法中单一滤波函数的应用和设计通常需要在空间分辨和密度分辨之间进行折衷, 无法同时在两个方面达到最优<sup>[4]</sup>。本文针对这一类具有特殊材料结构特征的工件, 开展基于 FBP 理论的 CT 重建算法研究, 重点围绕重建过程中的滤波环节, 结合理论分析和计算机仿真, 研究设计针对性的投影数据滤波处理方法, 以提高图像重建质量。

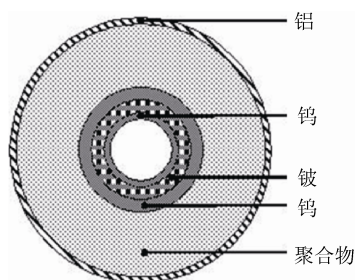


图 1 高密度差多层球壳工业构件示意图

## 1 多层球壳 CT 仿真软件平台建立

计算机仿真是开展 CT 技术研究的重要方法, 能够大大节省费用和时间成本, 有效促进研究工作进展。针对高密度差多层球壳的 CT 算法研究, 构建平行束圆周扫描投影及图像重建系统模型, 开发建立了 CT 仿真研究软件平台。可为多层球壳 CT 重建算法研究提供所需要的仿真投影数据, 并对改进算法的有效性和精确程度进行验证<sup>[5-6]</sup>。

### 1.1 平行束 CT 系统建模

X 射线穿过物体时, 与物体发生光电效应、康普顿效应、电子对效应等物理作用, 射线强度发生衰减, 采用 CT 装置获得 X 射线从不同方位角度穿透物体前后的强度信息, 再通过一定的数学运算方法就能够重建出物体内部材料对射线的线衰减系数分布<sup>[7]</sup>。X 射线 CT 投影扫描装置通常由 X 射线源、扫描控制系统和投影探测系统三部分构成, 所建立的多层球壳截面的平行束 CT 投影系统模型如图 2 所示, 将射线束和探测器进行一定程度的简化处理, 假设射线束为理想的平行束, X 光子能量单

一, 初始强度均匀, 且穿透物体时无散射产生, 各探测器单元对射线的响应一致。

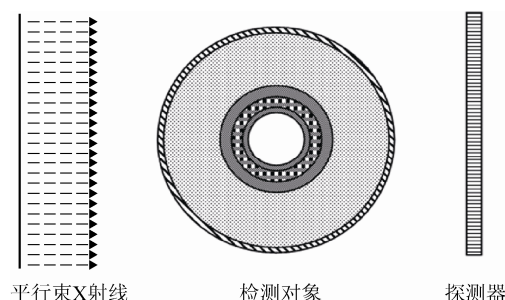


图 2 多层球壳截面投影系统模型

采用计算机解析仿真方法生成系统模型, 在给定射线源和探测器单元位置的情况下, 能够精确计算出物体对射线的衰减路径长度。仿真过程中将具体物理过程忽略, 每个探测器单元对应一条独立的 X 射线束, 相互间无串扰, 射线沿路径的线积分通过与每个组件的相交弦长计算, 以各组件材料的线衰减系数为权重给出信号加权和, 即得到仿真投影数据。对于不同性质和强度噪声的模拟, 在理想投影数据生成后, 通过专门的函数进行添加。

### 1.2 仿真研究软件平台实现

C++ 具有高效与灵活的特点, 是计算机应用软件开发的首选编程语言, 而 MATLAB 系统则包含强大的矩阵运算和图像数据处理功能, 在充分理解掌握平行束 CT 投影、FBP 图像重建理论及其计算机实现方法的基础上, 基于 C++ 和 Matlab 联合开发完成了针对高密度差多层球壳 CT 算法研究的软件平台<sup>[8-9]</sup>。其中集成了检测对象模型建立、投影数据获取、基于 FBP 算法的图像重建、以及图像后处理与分析等 CT 检测的重要环节与方法, 且为仿真研究预设了多种接口。基于此平台及其源代码, 可对模型的结构组成和缺陷特征、投影扫描和图像重建过程中的一系列参数进行设置和修改, 从而灵活方便地开展针对高密度差多层球壳的 CT 仿真研究。图 3 显示的是基于该软件平台对多层球壳截面模型进行模型生成、投影数据获取, 以及 FBP 图像重建的分步仿真执行过程。

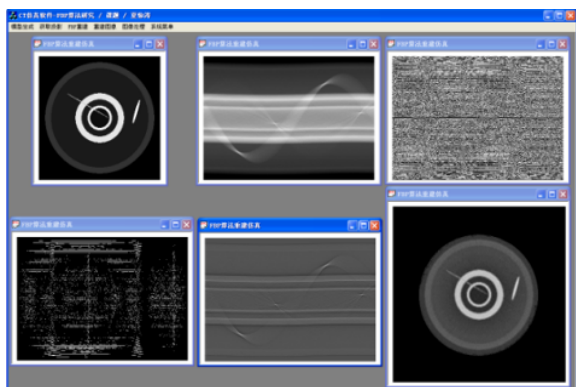


图 3 重建仿真分步执行过程图像

## 2 多层球壳截面投影的分区域差异化滤波设计

### 2.1 对传统 FBP 算法单一函数滤波的分析

FBP 算法的基本思想是将 CT 扫描系统中的光源、探测器和被检测物体放在一个几何空间当中建模, 以 random 变换和傅里叶中心切片定理为理论依据, 将探测器上经过滤波处理的投影值反投影到点源的空间位置上去<sup>[2-4]</sup>。其理论公式为<sup>[10]</sup>

$$f(x, y) = \int_0^\pi p(t, \theta) \times h(t) d\theta = \int_0^\pi d\theta \int_{-\infty}^{\infty} P(\omega, \theta) |\omega| e^{j2\pi\omega t} d\omega$$

式中:  $t = x \cos \theta + y \sin \theta$  表示投影角为  $\theta$  时, 通过点  $f(x, y)$  的射线与中心投影线的距离;  $p(t, \theta)$  和  $P(\omega, \theta)$  分别表示角度  $\theta$  下的投影及其傅里叶变换;  $h(t)$  代表理想滤波函数, 频率响应为  $|\omega|$ 。

根据佩利-维纳准则, 理想滤波函数无法物理实现<sup>[4]</sup>, 实际常用的有 RL 和 SL 等函数, 分别是通过对  $h(t)$  在傅里叶变换域加矩形窗和 Sinc 窗得到的<sup>[5,7]</sup>。总的来说, RL 滤波侧重于重建图像的空间分辨, 而 SL 函数能更好地抑制投影数据中的高频噪声, 减小重建图像振荡, 但其空间分辨不及 RL 函数, 低频段重建图像质量也要差一些。在采用传统 FBP 算法对一个物体截面进行重建时, 只能使用单一函数进行投影滤波, 很难兼顾重建的空间分辨和噪声抑制作用, 为提供较高的空间分辨就要以牺牲噪声性能为代价, 即使混合滤波函数的设计和应用也只能在两者之间进行折衷, 不能同时达到最优<sup>[11]</sup>。

### 2.2 基于频率特征的分区域投影滤波设计

针对高密度差多层球壳构件可限定一种平行束 CT 扫描方式, 即“扫描旋转轴线垂直于检测截面且过其中心”, 这在工程上是容易实现的, 本文称之为多层球壳扫描方式 (Scan Mode for Multilayer Ball, SMMB)。多层球壳的各向截面除两端为单一材料的二维圆形外, 其它均为多层环状结构分布, 基于 SMMB 扫描得到的投影正弦图可呈现出与截面对应的空间区域化分布, 如图 4 所示。

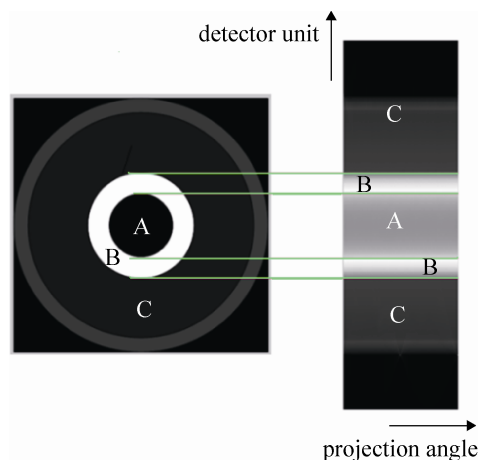


图 4 基于 SMMB 的截面投影正弦图及其区域分割

多层球壳构件内部各壳层发生不同缺陷的概率是不一样的, 检测者对不同缺陷的关注度也有所差异。如图 4 中截面模型的 C 壳层对应于聚合物等低密度材料, 相对容易出现裂缝和间隙, 而 B 壳层对应于重金属材料, 检测者会更关心其材料是否发生老化或掺杂。由于 SMMB 扫描得到的投影正弦图与截面具有对应的空间区域分布, 可先对其进行图像分割, 再根据截面的主体频率特征和检测需求对不同区域的投影数据分别采取针对性的滤波处理。仍以图 4 所示多层球壳截面模型及其投影正弦图为例, 分区差异化滤波 (Region Differently Filtering, RDF) 设计如下:

1) 对于多层球壳中的聚合物等区域 (模型 C 壳层), 为重点检测可能出现的裂缝、间隙等缺陷, 在投影滤波时尽量保留和突出高频信息, 强调空间分辨, 为此采用 RL 滤波函数;

2) 对于重金属材料区域(B 壳层), 重点检测材料掺杂或老化等缺陷, 滤波时通过抑制高频分量减小 Gibbs 震荡, 强调密度分辨, 相对突出低频信息, 采用 SL 滤波函数;

3) 对于其它壳层, 如果没有特别检测需求, 为了重建算法实现方便, 设置其滤波函数与邻近壳层保持一致。如对于中空型多层球壳构件, 其中心区域(模型 A 壳层)为空气等, 在对其对应投影数据作滤波处理时与 B 壳层一致。同理, 对外壳层的投影滤波与 C 壳层保持一致。

### 2.3 基于 RDF 滤波的 FBP 图像重建流程

基于分区差异化滤波的图像重建基本流程如图 5 所示。

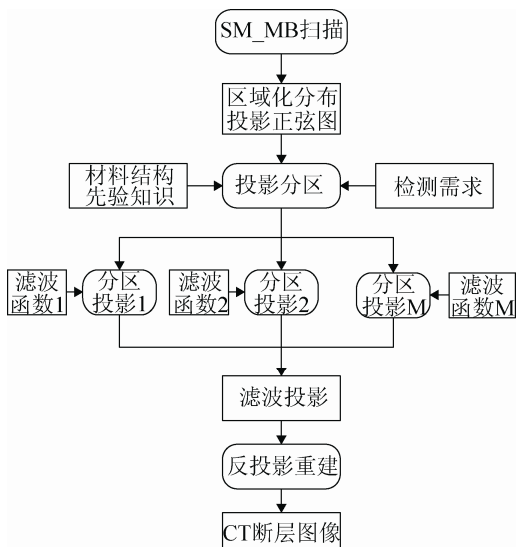


图 5 基于 RDF 滤波的图像重建基本流程

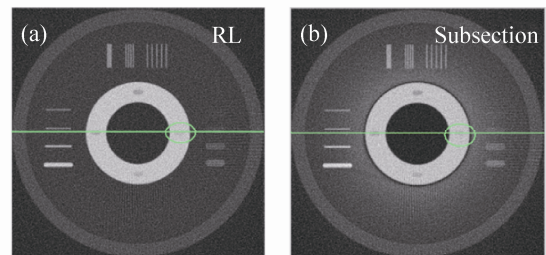
在正弦图区域分割的具体实现方面, 基于阈值处理或边缘算子搜索等数字图像处理方法进行内部边缘检测, 并结合截面材料结构尺寸的相关先验数据和检测需求分析进行分割。在分区滤波的具体实现上, 就是在完成投影正弦图空间区域分割的基础上, 对每一个视角的投影数据进行分段滤波。

## 3 重建仿真与分析

基于开发的 CT 仿真研究软件平台, 采用 SMMB 扫描方式对多层球壳截面模型在 180°视角

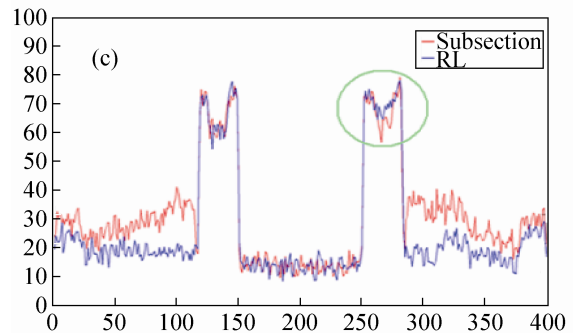
范围内进行间隔 1°连续旋转投影仿真, 向得到的理想仿真投影数据中加入泊松噪声, 再分别采用 RL、SL 和 RDF 滤波方式完成图像重建<sup>[12-13]</sup>。

图 6(a)和图 6(b)分别为 RL 和 RDF 滤波重建结果, 图 6(c)为两者第 200 行像素(绿线标示)的灰度曲线。在模型的重金属材料区域内部(绿色圆周内)设置了密度微变, 从对应的灰度曲线可以看出, 由于 RDF 滤波对重金属区域投影数据采用 SL 滤波, 相较于对全部投影基于单一 RL 函数的滤波而言, 其对重金属区域的密度微变更加敏感, 更容易检测出因材料老化或掺杂所导致的密度微弱变化。而对于低密度材料区域, 两者具有同样的滤波处理方法和图像重建效果, 所以整体而言, RDF 滤波要优于 RL 滤波。



(a) RL 滤波重建图像

(b) RDF 滤波重建图像



(c) 灰度曲线比较

图 6 RL 滤波 vs. RDF 滤波

图 7(a)和图 7(b)分别为基于 SL 和 RDF 滤波的重建结果, 图 7(c)为两者第 50 行像素(见绿线标示)的灰度曲线。在模型的低密度材料区域内部设置了反映重建空间分辨能力的三个线组, 绿线包围区域内的单像素细线间隔距离最近, 对重建空间分辨要求最高, 图 7(c)中标出了其对应的灰度曲线。可以

看出, RDF 滤波对低密度材料区域投影数据采用的是 RL 滤波, 相较于对全部投影数据单一的 SL 函数滤波而言, 重建低密度区域具有更好的空间分辨, 更容易检测出内部可能出现的裂缝或间隙。对于重金属材料区域, 两者都采用 SL 函数滤波, 具有同样的图像重建质量, 就整体效果而言, RDF 滤波也要优于单一 SL 函数滤波。

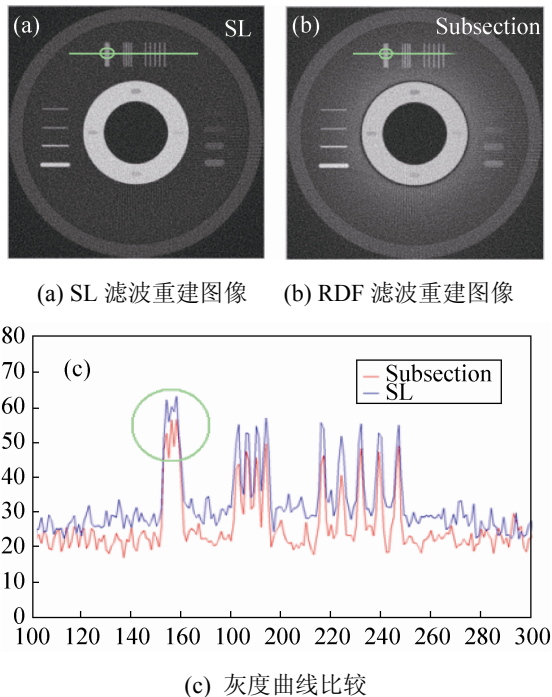


图 7 SL 滤波 vs. RDF 滤波

## 4 结论

本文针对一类高密度差多层球壳工业构件的 FBP 图像重建问题, 开展了大量的理论分析和计算机仿真工作, 研究提出一种分区域差异化滤波处理方法。仿真表明, 因为该方法对检测截面不同区域的投影数据采取更具针对性的滤波处理, 相较于任何一种单一的滤波方式, 其重建图像有更好的整体质量及缺陷检测效果。尽管本文仿真仅限于一维投影滤波和二维图像重建, 但对锥束投影 CT 及三维图像重建同样具有一定的参考和验证作用。分区域差异化滤波处理方法同样适用于多层球壳类似结构构件的直接三维 CT 图像重建, 只是在滤波环节的具体实现上会有所差别。

## 参考文献:

- [1] 夏惊涛, 王群书, 李斌康, 等. 多层球状物角度稀疏投影 CT 重建仿真研究 [J]. CT 理论与应用研究, 2014, 23(2): 249-256. (Xia Jingtao, Wang Qunshu, Li Binkang, et al. Simulation Study of Spherical Multilayer Object CT Reconstruction from Sparse Projection Data [J]. CT Theory and Applications, 2014, 23(2): 249-256.)
- [2] 张朝宗, 郭志平, 王贤刚, 等. 计算机断层成像技术原理、设计、伪像和进展 [M]. 北京: 科学出版社, 2005. (Zhang CZ, Guo ZP, Wang XG, et al. Computed tomography principle, design, artifacts and recent advances [M]. Beijing, China: Science Press, 2005.)
- [3] 范慧贇. CT 图像滤波反投影重建算法的研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007. (FAN Huiyun. Research on Filtered Backprojection Algorithms of CT Image Reconstruction [D]. Xian, China: Northwest Polytechnical University, 2007.)
- [4] 庄天戈. CT 原理与算法 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992. (Zhuang TG. CT Principles and algorithms [M]. Shanghai, China: Shanghai Jiaotong University Press, 1992.)
- [5] 夏惊涛, 王群书, 马继明, 等. 高密度差多层球壳双能 CT 图像重建方法 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(4): 044002(5). (Xia Jingtao, Wang Qunshu, Ma Jiming, et al. Study of Image Reconstruction Method of Dual Energy CT for Multilayer Spherical Shell With Great Density Difference [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(4): 044002(5).)
- [6] 张朝宗, 郭志平, 张朋, 等. 工业 CT 技术和原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2009. (Zhang CZ, Guo ZP, Zhang P, et al. The technology and principle of industrial CT [M]. Beijing, China: Science Press, 2009.)
- [7] 蔡玉芳, 李丹, 王珏. 工业 CT 图像边缘伪影校正 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(3): 755-761. (Cai Yufang, Li Dan, Wang Jue. Edge artifact correction for industrial computed tomography images [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(3): 755-761.)
- [8] 方黎勇, 白金平, 李辉, 等. 工业 CT 图像轮廓提取与优化系统设计 [J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(9): 2207-2211. (Fang Liyong, Bai Jinping, Li Hui, et al. Design of contour extraction and optimization system of industrial computed tomography images [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(9): 2207-2211.)
- [9] Lewitt R M. Reconstruction algorithms: Transform methods [J]. Proc IEEE (S0018-9219), 1983, 71(3): 390-408.

(下转第 3072 页)