



·粒子束及加速器技术·

基于投影融合的多层球壳双能 CT 算法研究*

夏惊涛, 盛亮, 黑东炜, 唐波, 陈俊, 魏福利, 马戈, 罗剑辉

(西北核技术研究所 强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室, 西安 710024)

摘要: 对高密度差多层球壳结构件进行双能 CT 检测, 需要研究同时基于高低能射线两套投影数据的图像重建方法。先分别重建再进行图像融合的方法, 不能充分利用两种能量射线投影的互补信息, 重建图像质量不高。针对高密度差多层球壳结构特征, 通过设计限定投影扫描方式获取区域分布明确的高、低能射线投影正弦图, 基于正弦图区域分割重组和交集数据等值化一致性处理实现双能投影数据融合, 在此基础上完成图像重建。根据以上设计归纳出基于投影融合的多层球壳双能 CT 重建算法, 仿真结果表明算法可行, 且重建结果明显好于基于图像融合的方法。

关键词: 双能 CT 检测; 图像重建算法; 多层球壳; 仿真研究

中图分类号: TP391.7

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230132

Research of reconstruction algorithm based on projection data fuse for dual energy CT of multilayer spherical shell

Xia Jingtao, Sheng Liang, Hei Dongwei, Tang Bo, Chen Jun, Wei Fuli, Ma Ge, Luo Jianhui

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

Abstract: Using dual energy CT method to detect multilayer spherical shell components with great density difference, it is necessary to study the image reconstruction method based on two sets of projection data. The Method of Reconstructed at First and then Fused Based on Images cannot make full use of dual energy X-ray projection information, by which simulation research shows it is difficult to get good reconstructed image. On this basis, the paper focuses on the Method of Fused Based on Projection Data at First and then Reconstructed. Firstly, considering the structure characteristics of the multilayer spherical shell components with great density difference, the X-ray projection sinogram with clear regional distribution can be obtained through a specially designed scanning mode. Then extract effective projection data respectively from the high and low energy X-ray projection sinogram, do the consistency processing, and integrate them to become one sinogram. Finally use the FBP algorithm to complete the image reconstruction process. The concrete realization of the algorithm based on projection data fuse for dual energy CT of multilayer spherical shell is summarized, and computer simulation shows that better reconstructed images can be obtained.

Key words: dual energy CT, image reconstruction algorithm, multilayer shells, simulation research

在工业领域有一类高密度差多层球壳构件, 其总体结构为尺寸较大的多层同心球壳, 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, 针对此类构件开展高精度 CT 检测技术研究具有现实需求^[1]。构件中不同材质区域对 CT 扫描射线能量的需求差异非常大, 高至数 MeV, 低至几十 keV, 当采用高能射线扫描时, 由于低密度材料对射线衰减系数太小而难以重建其中的微小变化, 而采用低能射线又会被高密度材料截断, 为此需要采用双能射线 CT 方法进行检测^[1-2]。双能 CT 图像重建方法又可分为两大类, 第一类是基于图像融合, 即先基于高低能射线投影数据分别重建后再进行图像融合, 第二类则是基于投影融合, 先完成高低能射线投影数据融合后再进行图像重建。本文针对多层球壳结构件 CT 检测, 结合对上述两类方法的仿真和比较分析, 重点开展第二类基于投影数据融合的双能 CT 算法研究。

* 收稿日期: 2023-05-15; 修订日期: 2023-08-10
联系方式: 夏惊涛, 1981xjt2004@163.com。

1 基于图像融合的多层球壳双能 CT 仿真及分析

双能 CT 图像重建总体流程如图 1 所示,分为扫描投影和图像重建两个环节,首先根据工件中的材料密度和尺寸特点选用两种不同能量的 X 射线分别进行扫描投影,再综合利用获取的两套投影数据完成图像重建^[3-4]。

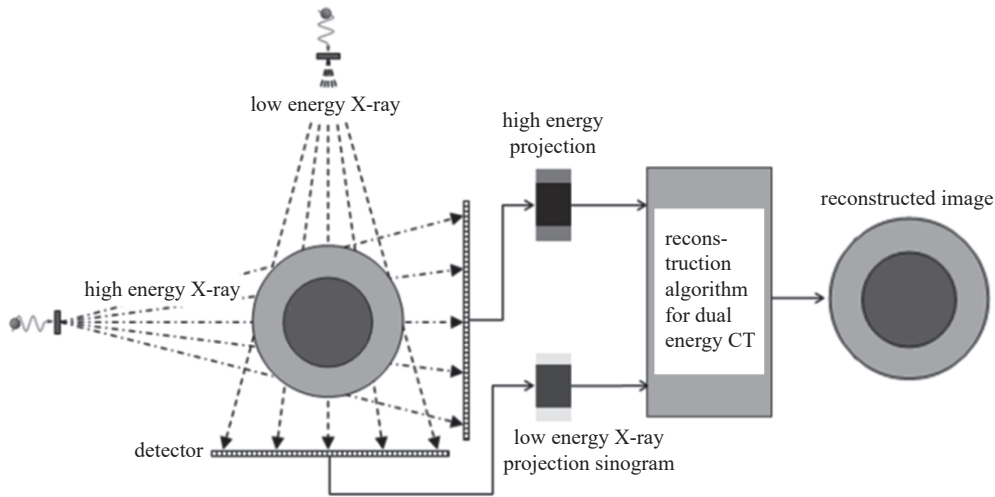
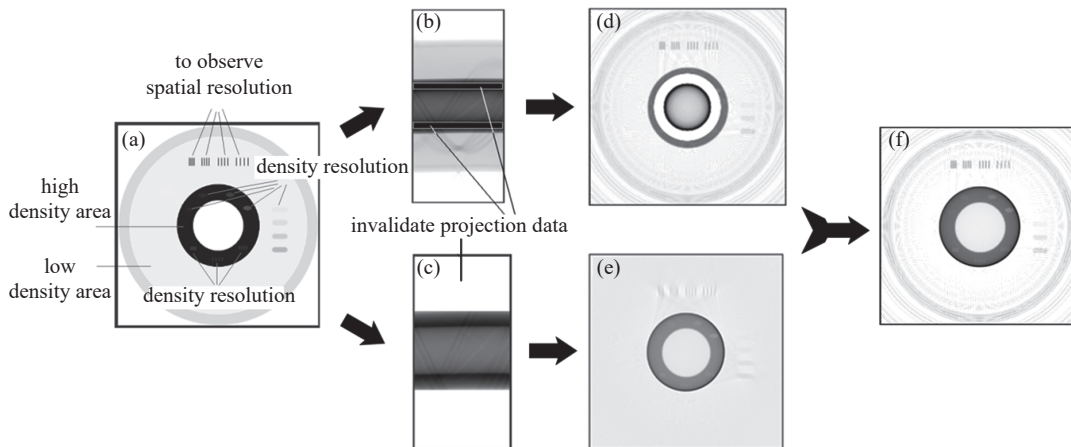


Fig. 1 Basic flow chart of dual energy CT system

图 1 双能 CT 基本流程

构建高密度差多层球壳截面模型,如图 2(a)所示,总体为多层环状结构,灰度值对应不同材料密度,在高、低密度材料区分别预设不同性质的“缺陷”以观察重建效果^[5-6]。分别模拟采用高、低能量 X 射线对其进行平行射线束圆周运动投影扫描,对得到的数据采用经典的 FBP 算法进行图像重建^[7-8]。图 2(b)为低能 X 射线模拟投影正弦图,由于高密度材料对低能射线阻挡吸收能力太强,在一些衰减最大的路径上发生投影截断。对应的 FBP 重建结果如图 2(d)所示,发生投影截断的高密度材料区域未得到重建,且因为被截断投影中同样损失了部分外围低密度材料区域信息,导致其重建结果中也出现严重伪影。图 2(c)为高能射线模拟投影正弦图,射线在穿过外围低密度区域时几乎无衰减,导致相应投影数据难以携带有用信息,其中间段投影数据相对完好,但主要携带的是模型内部的高密度区域信息。对应的 FBP 重建结果如图 2(e)所示,由于未得到足够的有效投影数据,外围低密度区域重建质量很差,其最外层甚至连基本轮廓都没能重建出来。

基于图像融合的双能 CT 重建方法,实质上就是在以上对单能射线投影分别重建的基础上,将两幅重建图像中的有用信息组合成一幅图像,结果如图 2(f)所示。其主要问题在于图像重建的核心过程都是基于单能射线扫描的不完备投影数据,最终得到的图像中所包含的高、低能投影信息实际上是被分割的,未进行有效的融合与相互弥补,所以重建图像中会产生严重的伪影和噪声,且难以在图像融合过程中进行抑制和消除,导致最终图像质量不



(a)sectional model of multilayer spherical shell; (b)simulant projection sinogram of low energy X-ray; (c)high energy X-ray projection; (d)reconstructed image with FBP for low energy projection; (e)reconstructed image for high energy projection; (f)final image

Fig. 2 Simulation of dual energy CT reconstruction with the flow of reconstructed at first and then fused based on images

图 2 基于先重建再融合过程的双能 CT 图像重建仿真

高。可见, 如何对两套投影数据进行有机融合以充分利用两种能量射线投影的互补信息, 是提高双能 CT 图像重建质量的关键。

2 多层球壳双能 CT 投影数据融合方法

根据以上仿真研究, 考虑先采取适当的方法将高、低两种能量的射线投影融合成一套相对完整的数据, 然后再完成图像重建, 为此首先进行针对性的投影扫描方式及数据融合方法设计。

2.1 扫描方式限定及投影正弦图区域分割

高密度差多层球壳的各向截面除两端为单一材料的二维圆形结构外, 其它均为多层环状分布。针对这一特殊结构特征, 可限定一种工程上易于实现且有利于图像重建的 CT 投影扫描方式, 要求“扫描旋转轴线垂直于检测截面且过其中心”, 以此在截面和其投影正弦图之间建立起特殊的空间对应关系, 以最典型的平行束圆周运动扫描方式为例, 可得到如图 3 所示的区域分布明显的投影正弦图^[9-11]。在此基础上, 结合相关材料结构先验知识对高、低能两幅投影正弦图进行灰度区域分布检测与图像分割, 分别提取其中高、低密度区域所对应的有效投影数据, 组合成一幅完整的投影正弦图, 再利用 FBP 等算法完成图像重建。

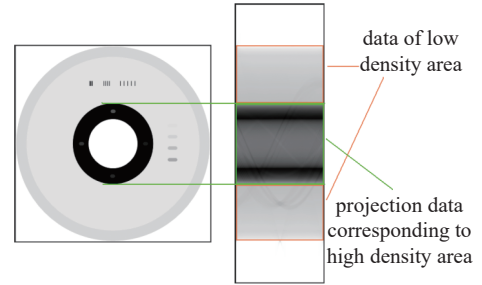


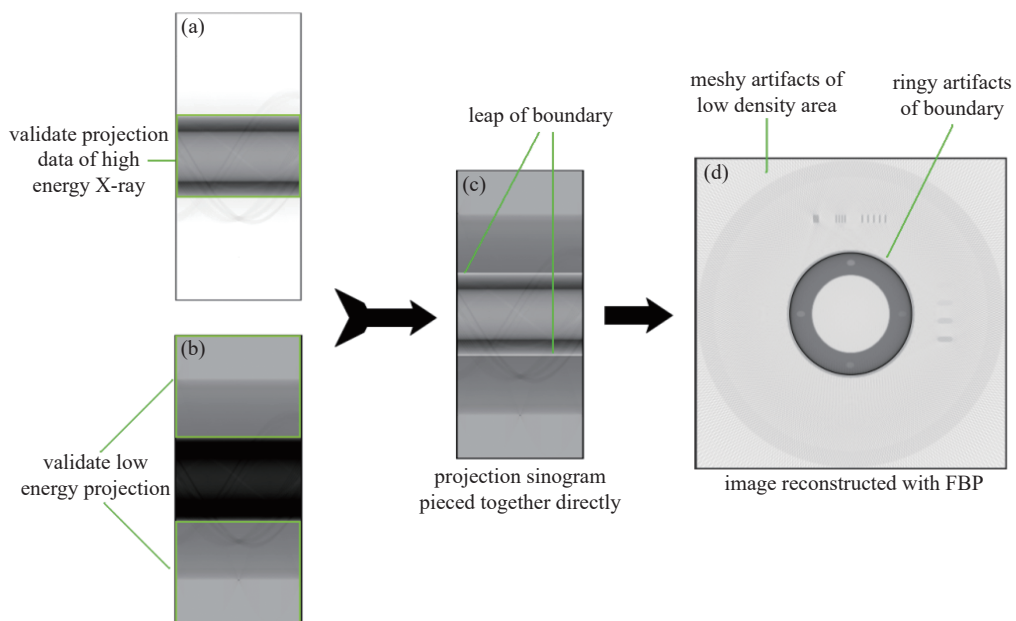
Fig. 3 Regional distribution of projection sinogram based on appointed scanning mode

图 3 限定扫描方式下的投影正弦图空间分布特征

2.2 基于交集等值化的投影数据一致性处理方法

基于上述扫描方式和投影数据区域化分布特征提取并重组 CT 投影正弦图, 可实现两种能量射线投影数据的有效互补。如图 4 所示, 图 4(a)和图 4(b)分别是高、低能射线投影正弦图, 图 4(c)是将截取的高、低能投影数据拼接组合形成的正弦图。由于两套投影数据分别是基于不同能量的射线扫描所得, 其在同一射线路径下的投影值会有差异, 相对于低能射线投影而言, 高能射线投影数据整体偏高, 所以在组合拼接时图 4(c)中边界灰度值出现了明显的跳变。图 4(d)是基于 FBP 算法的重建结果, 两部分投影数据的一致性差异对重建图像质量的影响具体表现在两个方面, 一是高、低密度材料边界处出现了对应的环形伪影, 使边界变得模糊, 影响对其位置的精确判断, 二是在外围低密度材料区引入大量网状伪影, 降低了该区域重建的分辨率。

针对上述两部分投影数据间的一致性差异所带来的重建问题, 可基于交集数据等值化等方法进行处理和改



(a)simulant high energy X-ray projection; (b) low energy projection; (c)projection directly pieced together by area; (d) reconstructed image with FBP

Fig. 4 Image reconstruction based on combined projection without consistency process

图 4 投影正弦图区域分割重组及 FBP 重建

进,本文提供一种相对简单易实现的权值调整法。设截取的初始有效高、低能投影数据分别为 $I_H(x,y)$ 和 $I_L(x,y)$,经过一致性校正处理之后的数据分别为 $I'_H(x,y)$ 和 $I'_L(x,y)$,最终融合后的投影数据为 $I(x,y)$,则有

$$I(x,y) = I'_H(x,y) \cup I'_L(x,y) = W_H I_H(x,y) \cup W_L I_L(x,y) = \frac{G_H + G_L}{G_H} I_H(x,y) \cup \frac{G_H + G_L}{G_L} I_L(x,y) = \frac{\sum_{n=1}^N R_n^H(x,y) + \sum_{n=1}^N R_n^L(x,y)}{\sum_{n=1}^N R_n^H(x,y)} I_H(x,y) \cup \frac{\sum_{n=1}^N R_n^H(x,y) + \sum_{n=1}^N R_n^L(x,y)}{\sum_{n=1}^N R_n^L(x,y)} I_L(x,y) \quad (1)$$

即在两幅高、低能射线初始投影正弦图中选取同一块区域,要求该区域对应的高、低能投影数据同时有效,分别记为 $R^H(x,y)$ 和 $R^L(x,y)$,区域灰度均值分别计为 G_H 和 G_L , N 为该区域包含的像素个数。 W_H 和 W_L 则分别为投影正弦图重组时的高、低能数据调整权值,具体值可由 G_H 和 G_L 确定,本文在仿真中设定 $W_H = \frac{G_H + G_L}{G_H}$; $W_L = \frac{G_H + G_L}{G_L}$,仅为其中一种计算方法,可供参考。

3 基于投影融合的多层球壳双能 CT 算法归纳及仿真

综上,建立的多层球壳双能 CT 重建算法流程如图 5 所示,主要分为 4 步:(1)初始化重建参数:主要包括多层球壳截面总直径 D_T 、内部高密度材料环绕区域直径 D_H 、探测器通道数量 N_D 、投影角度数量 N_A 、权值计算投影区域坐标 $(\theta_\alpha, \theta_\beta, N_\alpha, N_\beta)$ 等,其中 θ_α 和 θ_β 确定投影角度范围, N_α 和 N_β 确定线阵列探测器通道范围;(2)双能投影截取组合:基于阈值处理或边缘算子搜索等数字图像处理方法^[9,10,11],分别对高、低能射线投影数据正弦图进行内部边缘检测,再结合 D_H 等先验数据分析对正弦图进行区域分割,分别截取高、低密度材料区域对应的投影数据,并组合形成一幅尺寸参数不变的投影正弦图 $I_H(x,y) \cup I_L(x,y)$;(3)投影数据一致性处理:基于 $(\theta_\alpha, \theta_\beta, N_\alpha, N_\beta)$ 确定区域,根据特定方法计算得到数据调整权值 W_H 和 W_L ,将 W_H 和 W_L 分别与 $I_H(x,y)$ 和 $I_L(x,y)$ 相乘,得到数值调整后的投影正弦图;(4)重建图像:将 N_D 、 N_A 等 CT 扫描系统参数代入,采用 FBP 等算法对投影 $I(x,y)$ 进行重建运算,得到 CT 断层图像。

算法仿真结果如图 6 所示,从低能射线投影正弦图 6(a)中截取对应于低密度区域的两侧投影数据,同时从高能正弦图 6(b)中截取高密度区域所对应的中间段数据,对两部分数据按照空间位置进行组合,根据计算权值对数据进行一致化处理,即得到融合后的投影正弦图 6(c)。最后采用 FBP 算法进行重建得到结果如图 6(d)所示,相较于图 2(f)而言,重建图像中的伪影明显减少,层内更加平滑。由于两种能量射线投影中的有用信息在后续重建环节得到了更充分的利用,所以能重建出更高质量的图像。

4 结 论

本文针对高密度差多层球壳构件的 CT 检测,重点对基于投影数据融合的双能 CT 图像重建方法进行了仿真研究。在限定投影扫描方式的基础上,设计了基于正弦图区域分割重组和数据一致性处理的双能投影数据融合方法,在此基础上基于 FBP 等算法完成图像重建。归纳给出了多层球壳双能 CT 重建算法流程及关键步骤,并通过计算机软件仿真验证了其有效性。

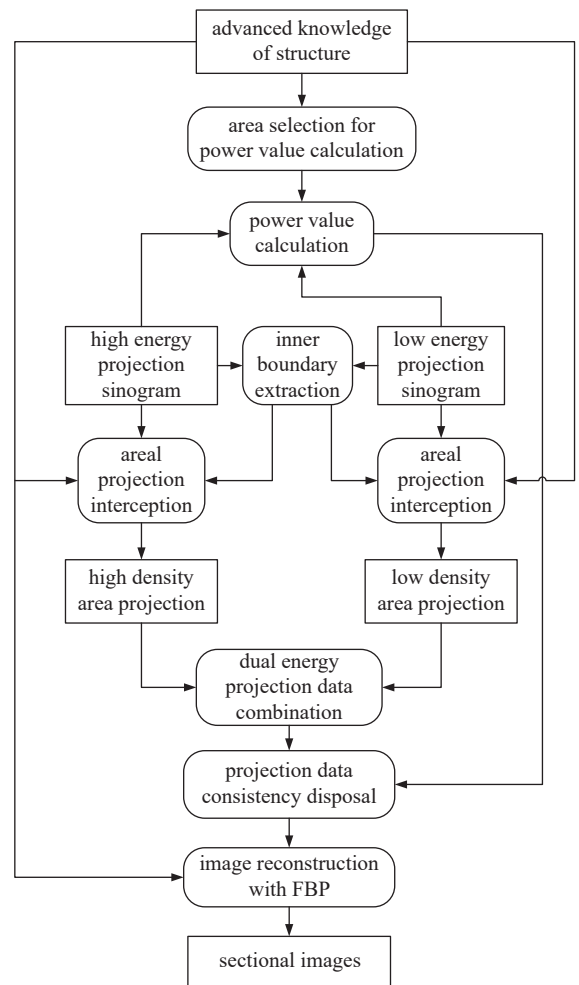
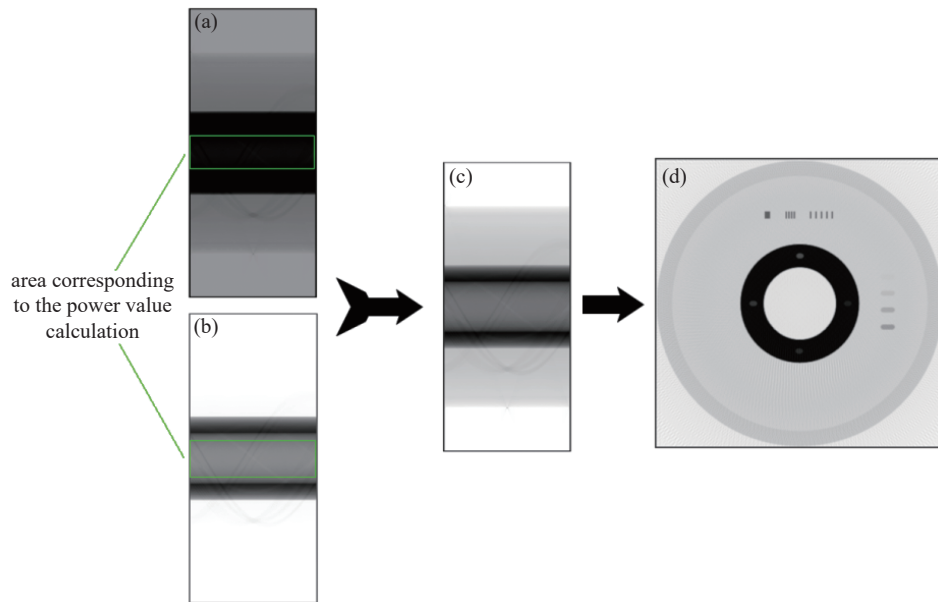


Fig. 5 Flow chart of image reconstruction based on projection data fuse

图 5 基于投影融合的双能 CT 图像重建算法流程



(a) low energy projection; (b) high energy projection; (c) fused projection; (d) reconstructed image

Fig. 6 Simulation of dual energy CT image reconstruction based on projection data fuse

图 6 基于投影融合算法的双能 CT 图像重建仿真

参考文献:

- [1] 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: 044002. (Xia Jingtao, Wang Qunshu, Ma Jiming, et al. Image reconstruction method of dual energy CT for multilayer spherical shell with great density difference[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 044002)
- [2] 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 Chaozong, Guo Zhiping, Zhang Peng, et al. The technology and principle of industrial CT[M]. Beijing: Science Press, 2009)
- [3] Hsieh J. 计算机断层成像技术: 原理、设计、伪像和进展[M]. 张朝宗, 郭志平, 王贤刚, 等译. 北京: 科学出版社, 2006. (Hsieh J. Computed tomography: principle, design, artifacts and recent advances[M]. Zhang Chaozong, Guo Zhiping, Wang Xiangang, et al, trans. Beijing: Science Press, 2006)
- [4] 庄天戈. CT原理与算法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992. (Zhuang Tiange. CT principles and algorithms[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1992)
- [5] Xia Jingtao, Wang Qunshu, Ma Jiming, et al. Development and application of analytical simulation software platform for parallel beam CT[C]//Proceedings of SPIE 9794, Sixth International Conference on Electronics and Information Engineering. 2015.
- [6] 夏惊涛, 王群书, 马继明, 等. 多层球壳构件FBP重建差异化滤波设计与仿真[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(12): 3061-3065,3072. (Xia Jingtao, Wang Qunshu, Ma Jiming, et al. Design and simulation of regional differently filtering method of FBP algorithm for multilayer spherical shell[J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(12): 3061-3065,3072)
- [7] He Y J, Cai A, Sun J A. Multiorientation simultaneous computation of backprojection for tomographic image reconstruction[J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(9): 822-824.
- [8] 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]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007)
- [9] 段黎明, 邱猛, 吴朝明. 面向逆向工程的工业CT图像预处理系统开发[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(4): 666-670. (Duan Liming, Qiu Meng, Wu Zhaoming. Development of industrial CT image pre-processing system for reverse engineering[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(4): 666-670)
- [10] 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)
- [11] 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)