

基于小波分析的分能段计算机断层扫描成像

孙春霞 潘晋孝 陈平

中北大学信息探测与处理山西省重点实验室, 山西 太原 030051

摘要 X射线多能计算机断层扫描(CT)方法通过多次圆轨迹扫描获取不同能量下的投影数据进行图像重建,扫描效率较低,受辐射剂量较大。分能段CT成像方法依据传统圆轨迹CT,对不同扫描角度采用不同能量,获取分能段投影。针对分能段投影的灰阶阶跃问题,采用精确高频定位的小波分析方法,结合小波低频的灰阶高度修正小波系数,实现小波逆变换后投影的灰阶修正,通过重建实现分能段CT成像。仿真结果表明,与硬化伪影校正方式相比,该方法在增加能量信息的同时消除了灰阶引起的灰阶伪影,可有效提高重建图像对比度并改善硬化伪影现象。

关键词 X射线光学;分能段投影;小波分析;低频分量;灰阶

中图分类号 O431.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.093401

Segmental Multi-Energy Computed Tomography Imaging Based on Wavelet Analysis

Sun Chunxia Pan Jinxiao Chen Ping

*Shanxi Provincial Key Laboratory of Signal Capturing and Processing, North University of
China, Taiyuan, Shanxi 030051, China*

Abstract The X-ray multi-energy computed tomography (CT), which primarily reconstruct images by collecting projections obtained by repeated circular scans at different energy, shows low scan efficiency and large dose of radiation exposure. The segmental multi-energy CT is studied. The tube voltage in every arc of a traditional circular trajectory CT scan is different to obtain the segmental multi-energy projection. Based on the accurate location of high frequency in the wavelet analysis, the gray-step of segmental multi-energy projection is corrected by the gray-step height of low frequency, and the segmental multi-energy CT imaging is realized. The simulation results indicate that compared with the hardening artifact correction mode, the method based on wavelet analysis eliminates the gray-step artifact, extends the energy spectrum information, and improves the reconstructed image contrast and hardening artifacts effectively.

Key words X-ray optics; segmental multi-energy projection; wavelet analysis; low frequency component; gray-step

OCIS codes 340.7440; 100.2000; 110.7440

1 引言

X射线计算机断层扫描(CT)成像技术广泛应用于医学、生物、物质检测、公共安全检查等诸多领域。随着技术的发展,适用于结构分析的传统单能X射线CT成像技术,已不能满足现代工业中物质组分区分与鉴定的成像需求。

目前多能X射线CT的研究主要为双能CT和多能CT。双能CT通过两种不同能谱段扫描,获取检测

收稿日期: 2016-05-11; **收到修改稿日期:** 2016-05-18; **网络出版日期:** 2016-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(61227003,61301259,61471325,61571404)、山西省自然科学基金(2015021099)、山西省优秀青年学术带头人专项

作者简介: 孙春霞(1990—),女,硕士研究生,主要从事计算机断层扫描理论与应用等方面的研究。

E-mail: 1194776956@qq.com

导师简介: 潘晋孝(1966—),男,博士,教授,主要从事计算机断层扫描理论与应用等方面的研究。E-mail: panjx@nuc.edu.com

对象的密度、原子序数等信息,一定程度上消除了重建图像硬化伪影,提高了物质识别能力^[1-4]。随着光子计数探测器技术的发展, Fornaro 等^[5]创建了可以区分 8 种能量数据的光子计数探测器,不但降低了噪声而且提高了图像对比度,但受成本、工艺等因素的限制,应用上存在一定的局限性。为实现等效于光子计数探测器的多谱 CT,牛素望等^[6]提出能谱滤波分离的多谱 CT 技术,即通过能谱滤波的方法,获得不同能量下的近似单能投影,实现了射线发射端能谱分离的多谱 CT,但操作复杂,扫描效率低。

为了提高多能 CT 成像的可应用性及扫描效率,本文研究了分能段 CT 成像理论与方法。分能段 CT 成像原理基于双能 CT 技术,结合传统 CT 的扫描模式,在各个扫描角度使用不同峰值管电压,从而获取分能段投影数据^[7]。并针对分能段投影的灰阶效应,研究灰阶抑制方法,通过传统重建算法实现具有较高对比度的 CT 成像。

2 分能段投影结构特性

双能段 CT 是分能段 CT 的基本模式,将圆形扫描轨道分离为两个弧度,在每个弧度上, X 射线管调谐为高/低电压。峰值管电压曲线如图 1(a)所示,投影获取方式如图 1(b)所示。对含有单物质磷的圆柱,以 60 kV 和 90 kV 为低、高能峰值电压进行数据采集,观察其投影特点,如图 2(a)所示。

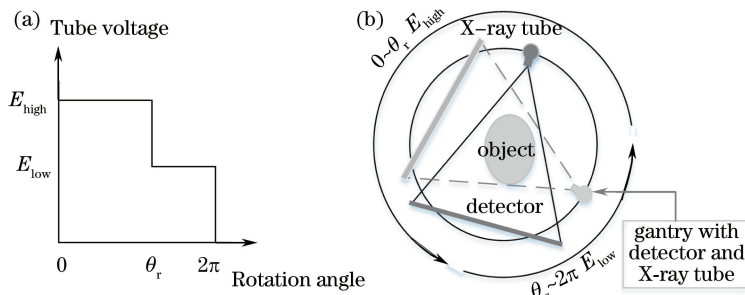


图 1 双能段 CT。(a)峰值能量曲线;(b)扫描形式

Fig. 1 Dual-energy CT. (a) Peak energy curve; (b) scan mode

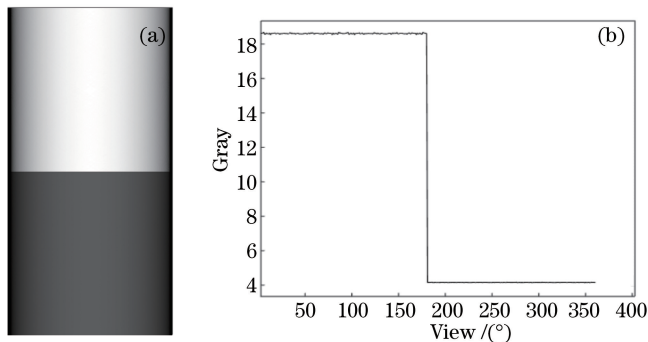


图 2 双能段 CT 投影分析。(a)双能段投影图;(b)探测元全角度灰度曲线

Fig. 2 Dual-energy CT projection. (a) Projection of dual-energy segmentation; (b) full-view gray curve

由图 2(a)可知,每段投影包含不同能量信息,与单一管电压下的投影信息相比,信息量有所增加。但分能段投影存在灰度阶跃,因此需在保留能量信息的同时消除灰阶伪影。

3 分能段投影预处理原理与算法

基于离散小波的多分辨率分析可在不同分解层下精确了解各个频段的信号成分,然后提取隐藏在数据后的有用信息^[8-9],从而为分能段投影消除灰阶提供理论基础。

3.1 小波分析基本原理

为保留投影细节信息并消除多能段投影的灰阶,利用最优小波基函数,将投影的余弦图经 Mallat 算法进行小波分解^[10]。设 H (低通)和 G (高通)为两个滤波算子,下标 r 和 c 分别表示图像的行和列。根据二维

Mallat 算法, 尺度为 $j-1$ 时分解式为

$$\begin{cases} C_j = H_c H_r C_{j-1} \\ D_j^1 = G_c H_r C_{j-1} \\ D_j^2 = H_c G_r C_{j-1} \\ D_j^3 = G_c G_r C_{j-1} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 C_j 为近似系数, D_j^1 、 D_j^2 、 D_j^3 分别为水平、竖直、对角细节系数。灰阶作为图像的结构信息, 存在于小波变换后的低频系数, 因此需要对 C_j 和 D_j^1 的低频系数进行灰阶处理。

3.2 小波系数预处理

对分能段投影进行多层离散小波变换, 然后消除最高层近似系数和水平细节系数中的灰阶。首先取近似系数 $C_j(r, c)$ 的每一行, 对不同段位内相应的小波系数分别求其均值 M_1, M_2, \dots, M_n , 避免内部结构信息的丢失。抑制灰阶的公式为

$$C_j(r_0, h_i^*) = C_j(r_0, h_i^*) + |M - M_i|, M = \max\{M_1, M_2, \dots, M_n\}, \quad (2)$$

式中 r_0 表示任意一行, h_i^* 对应区域均值为 M_i 的列坐标。

为了提取列方向的高频有用信息, 需要对细节信息 D_j^1 系数进行选择性的处理。对各段位内的小波系数分别求均值 $M_{10}, M_{20}, \dots, M_{n0}$, 再求得对应位置高频系数波动的标准差 $S_{10}, S_{20}, \dots, S_{n0}$, 对该部分进行灰阶处理:

$$D_j^1(r_0, h_i^{**}) = \begin{cases} D_j^1(r_0, h_i^{**}) + |M_0 - M_{i0}| - |S_{i0}| \\ D_j^1(r_0, h_i^{**}), \text{ if } M_0 = M_{i0} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $M_0 = \max\{M_{10}, M_{20}, \dots, M_{n0}\}$, h_i^{**} 表示区域均值为 M_{i0} 的列坐标。(3)式中增加了标准差的作用, 在消除灰阶的同时, 保留了细节信息。对处理后的小波系数进行小波逆变换, 得到灰阶一致的分能段投影, 再采用传统滤波反投影(FBP)算法^[11]对该投影进行重建。

4 仿真模型设计与结果分析

4.1 单物质双能段 CT

采用上述小波分析方法去除单物质磷的分能段投影[图 2(a)]的灰阶, 得到灰度一致投影, 如图 3 所示, 取中间一行分析灰度处理情况, 如图 4 所示。

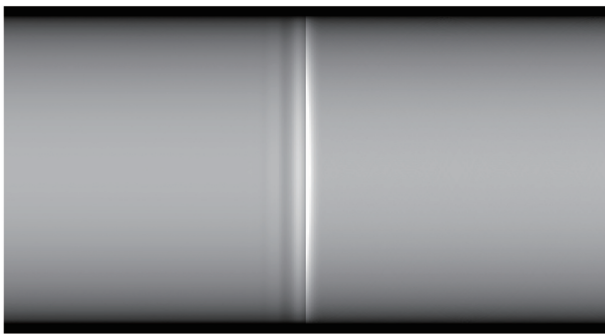


图 3 单物质双能段投影

Fig. 3 Dual-energy projection of single material

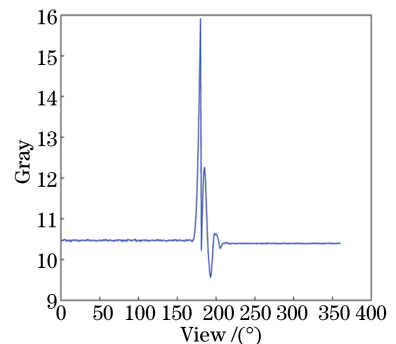


图 4 双能段投影灰度曲线

Fig. 4 Gray curve of dual-energy projection

为确保细节信息不丢失, 在小波分析中未进行高频系数处理, 因此修正后投影中出现异常灰度(图 4), 重建时会使重建图像出现内部结构灰度变化, 如图 5(a)所示。

图 5(a)的边缘出现灰度剧烈变化的环状伪影, 理论上 360° 投影对圆轨迹重建是冗余的, 因此对灰度跳变的区域进行投影重排可达到无损消除该区域的目的^[12], 例如如图 5(c)中伪影的减少。为了对比图像伪影的去除效果, 采用基于原始投影正弦图的硬化伪影校正方法^[13]对 60 kV 和 90 kV 投影进行校正重建, 如图 5(e)、(g)所示。

为了定量分析重建结果的伪影消除情况, 取图 5 中间一行灰度值进行比较, 对比结果如图 6 所示。

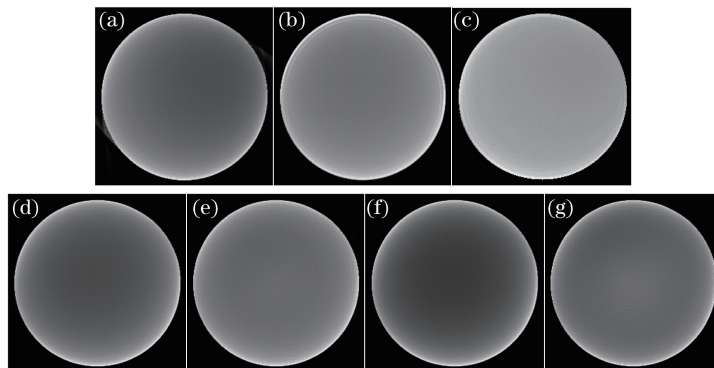


图 5 双能段投影重建结果。(a)分段 60 kV 和 90 kV 投影;(b)完全角度投影重建;(c)有限角度投影重建;
(d) 60 kV 投影;(e) 60 kV 投影校正后重建;(f) 90 kV 投影;(g) 90 kV 投影校正后重建

Fig. 5 Reconstruction of dual-energy projection. (a) Segmental projection at 60 kV and 90 kV;
(b) reconstruction of full-view projection; (c) reconstruction of partial-view projection; (d) 60 kV projection;
(e) reconstruction of corrected 60 kV projection; (f) 90 kV projection; (g) reconstruction of corrected 90 kV projection

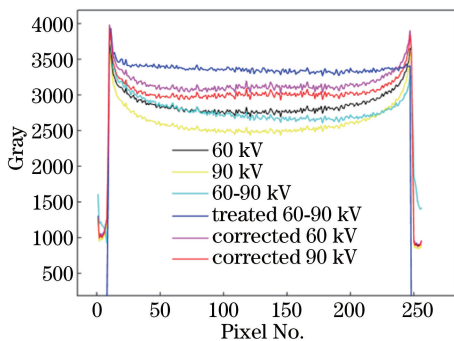


图 6 灰度曲线

Fig. 6 Gray curves

图 6 中双能段 CT 通过引入能段信息增加了重建图像内部信息,并且采用小波分析消除了投影灰阶,降低了图像的灰阶伪影和硬化伪影。与硬化伪影校正结果比较表明,硬化伪影校正效果不显著,因此分能段投影处理后重建图像质量更好。

4.2 多物质双能段 CT

为了验证小波分析去灰阶方法的适用性,对含多种物质的模型进行双能段 CT 的扫描。设计圆柱形模型,材质选取铝、硅和硫 3 个不同的组分,其横切面模型如图 7 所示。图 8 为 3 种组分对应的线衰减系数曲线。

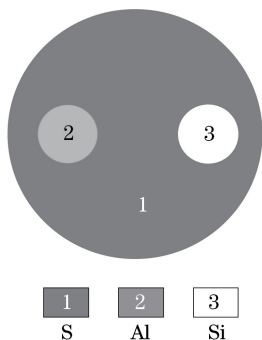


图 7 仿真模型的二维图像

Fig. 7 Transverse plane of simulation phantom

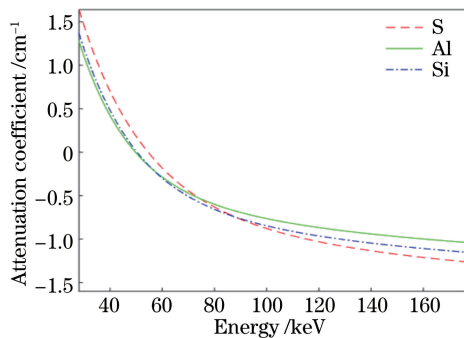


图 8 仿真模型中不同组分的线衰减系数曲线
Fig. 8 Linear attenuation coefficient curves of phantom materials in numerical simulation

针对图 7 的模型,依据图 8 中 3 种组分对应的线衰减系数曲线,选取 60 kV 和 90 kV 为双能段扫描的两个管电压。在 $[0, \pi]$ 区间采用 60 kV 扫描,在 $[\pi, 2\pi]$ 区间则用 90 kV 采样,得到双能段 CT 投影,如图 9(a)所示。对其进行小波处理,得到灰度一致的完全角度投影,如图 9(b)所示。

从图 9(b)可知,预处理后的投影灰阶消失并保留了该投影的内部物质结构信息。对其进行投影重排并对重排后投影和多种能量下的投影进行重建,如图 10 所示。

从图 10 可知,90 kV 重建图像的铝和硅(图 7 中 2、3 区域)的边缘信息不明显,但增加能量信息后,图 10(c)的对比度提高,相比 60 kV 重建图像[图 10(a)],其硬化伪影严重,经过投影重排后的重建图像[图 10(d)]伪影减少,对比度提高,重建结果质量较好。

为了定量分析图像伪影变化,对其重建图像中间一行的灰度曲线进行对比分析,如图 11 所示。

图 11 中双能段投影预处理后的重建图像硬化伪影明显减少,保留了物质的边缘信息,提高了重建图像对比度,说明利用小波分析预处理后的投影不仅消除了灰阶伪影,而且抑制硬化伪影,提高了重建图像对比度,具有一定的优势。

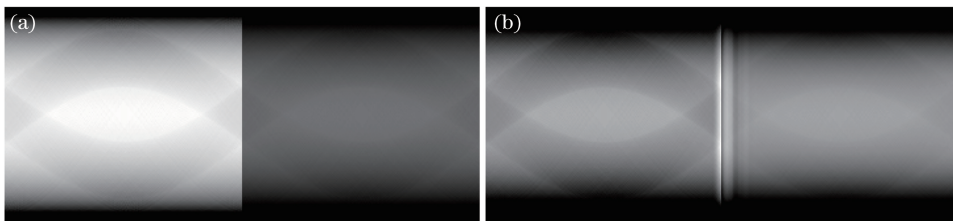


图 9 3 种物质的双能段投影。(a) 未处理投影;(b) 灰度一致投影

Fig. 9 Dual-energy projection of three elements. (a) Uncorrected projection; (b) full-view projection with consistent gray

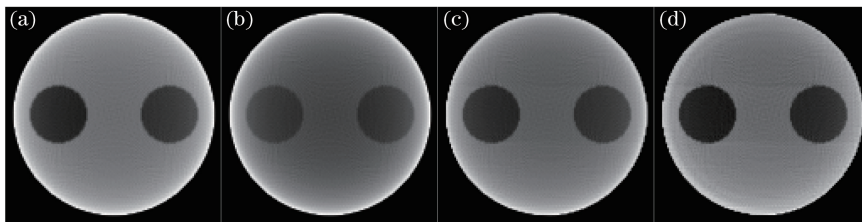


图 10 不同能量的 FBP 重建结果。(a) 60 kV;(b) 90 kV;(c) 未处理 60 kV 和 90 kV;(d) 投影重排 60 kV 和 90 kV

Fig. 10 FBP reconstruction for different energy. (a) 60 kV; (b) 90 kV; (c) untreated 60 kV and 90 kV; (d) recomposed 60 kV and 90 kV

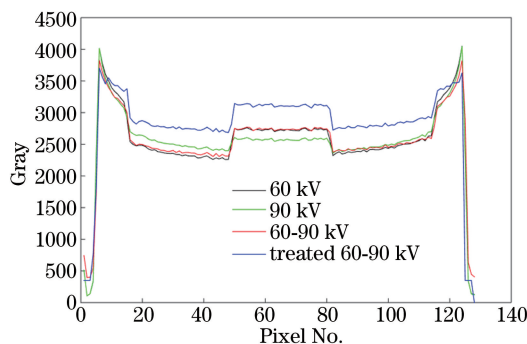


图 11 灰度曲线对比图

Fig. 11 Contrast of gray

4.3 多物质多能段 CT

为进一步验证多能段投影在提高重建图像质量方面的优势,采用三能段 CT,在 $[0, 2\pi/3]$ 区间采用 60 kV 扫描,在 $[2\pi/3, 4\pi/3]$ 区间采用 90 kV 扫描,在 $[4\pi/3, 2\pi]$ 区间采用 140 kV 扫描。依据上述处理方法对三能段投影进行处理,结果如图 12(a)所示。进行投影重排去除灰度异常区域,并对其进行重建,如

图 12(b)所示。

为了定量分析三能段和双能段投影重建结果,对双能段重建图像[图 10(d)]和三能段重建图像[图 12(b)]进行中间一行灰度曲线比较,结果如图 13 所示。

图 13 中由于三能段投影增加了能段信息,其重建图像硬化伪影较少,说明引入更多能段信息可有效减少硬化伪影,提高 CT 重建图像的对比度及质量。

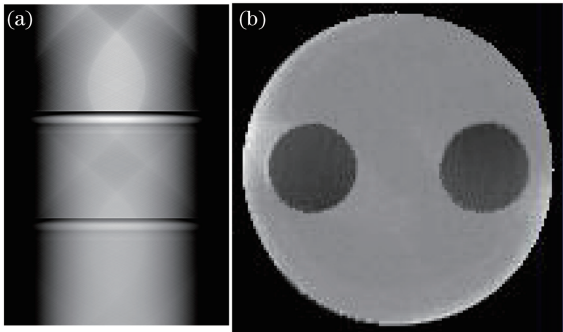


图 12 三能段 CT 结果。(a)小波变换投影;
(b)预处理投影重建结果

Fig. 12 Trinal-energy CT results. (a) Projection after wavelet transformation; (b) reconstruction of pretreated projection

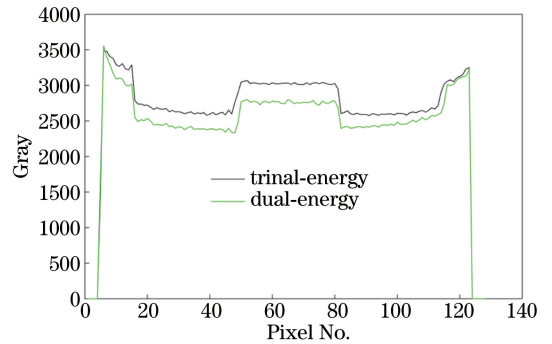


图 13 灰度曲线对比

Fig. 13 Contrast of gray

5 结 论

为了提高多能段 CT 效率,减少重建图像伪影并改善重建图像质量,在分析分能段 CT 成像方法的基础上,利用小波分析消除了分能段投影的灰阶,通过重建实现了分能段 CT 成像。单物质与多物质双能段图像的仿真实验表明双能段 CT 能有效降低图像灰阶,减少硬化伪影,提高物质对比度。在多物质三能段 CT 实验中物质对比度及重建质量得到改善,验证了分能段 CT 成像方法的适用性及可行性,为下一步多能段 CT 检测与分析提供了支持。

参 考 文 献

- 1 Ying Z, Naidu R, Crawford C. Dual energy computed tomography for explosive detection[J]. Journal of X-Ray Science and Technology, 2006, 14(4): 235-256.
- 2 Engler P, Friedman W. Review of dual-energy computed tomography techniques[J]. Materials Evaluation, 1990, 48(5): 623-629.
- 3 Silva A C, Morse B G, Hara A K, *et al.* Dual-energy (spectral) CT: Applications in abdominal imaging[J]. Radio Graphics. 2011, 31(4): 1031-1046.
- 4 Zhang Weiwei, Zhang Hua. Latest development of dual energy imaging technology[J]. China Medical Equipment, 2012, 27(9): 8-12.
张唯唯, 张 华. 双能成像技术的最新进展[J]. 中国医疗设备, 2012, 27(9): 8-12.
- 5 Fornaro J, Leschka S, Hibbeln D, *et al.* Dual- and multi-energy CT: Approach to functional imaging[J]. Insights into Imaging, 2011, 2(2): 149-159.
- 6 Niu Suyun, Pan Jinxiao, Chen Ping. Multi-spectrum computed tomography imaging method based on energy spectrum filtering separation[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1034001.
牛素莹, 潘晋孝, 陈 平. 基于能谱滤波分离的多谱计算机层析成像方法[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1034001.
- 7 Shen L, Xing Y X. Multienergy CT acquisition and reconstruction with a stepped tube potential scan[J]. Medical Physics, 2015, 42(1): 282-296.
- 8 Zhang Su, Fu Qiang, Duan Jin, *et al.* Low contrast target polarization recognition technology based on lifting wavelet[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0201002.
张 肃, 付 强, 段 锦, 等. 基于提升小波的低对比度目标偏振识别技术[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0201002.

- 9 Wei Zhe, Zheng Lei, Li Zhanming. Application of wavelet multi-resolution theory to heart sounds analysis[J]. Chinese Medical Equipment, 2010, 31(10): 17-19.
韦 哲, 郑 蕾, 李战明. 小波多分辨率理论在心音信号分析中的应用[J]. 医疗卫生装备, 2010, 31(10): 17-19.
- 10 Wang Zhen, Wang Mingquan. Research on 3D-CT image reconstruction algorithm based on wavelet multi-scale decomposition FPD projection data pre-processing[J]. Semiconductor Technology, 2007, 32(7): 622-625.
王 朕, 王明泉. 投影数据预处理三维 CT 重构算法研究[J]. 半导体技术, 2007, 32(7): 622-625.
- 11 Ma Jiming, Zhang Jianqi, Song Guzhou, *et al.* Total variation constrained iterative filtered back projection CT reconstruction method[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0234002.
马继明, 张建奇, 宋顾周, 等. 全变分约束迭代滤波反投影 CT 重建[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0234002.
- 12 Li Yang, Wang Renhuang, Zheng Yingna, *et al.* Analysis of fan beam projections re-composition method and projection geometry on optical tomography[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(4): 571-574.
李 扬, 汪仁煌, 郑莹娜, 等. 光 CT 的扇束投影重排方法及投影几何分析[J]. 电子学报, 2004, 32(4): 571-574
- 13 Fu Jian, Lu Hongnian, Ren Huayou, *et al.* Harden correction based on original projection sonogram for X-CT [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(6): 725-728.
傅 健, 路宏年, 任华友, 等. 基于原始投影正弦图的 X-CT 硬化校正[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(6): 725-728.