

基于投影匹配的 X 射线双能计算机层析成像 投影分解算法

李保磊^{1,2} 张耀军¹

(¹ 公安部第一研究所, 北京 100048; ² 北京大学数学科学学院, 北京 100871)

摘要 X 射线双能计算机层析成像(CT)技术是安全检查领域一种重要的材料探测与识别手段。双能 CT 投影分解是双能 CT 预处理重建算法的核心内容和关键步骤。针对现有投影分解算法的不足,提出了一种基于投影匹配的双能 CT 投影分解算法。依据系统能谱和基材料线性衰减系数曲线,通过求解投影积分方程组建立高低能投影查找表。对于给定的高低能投影,在查找表中寻找最佳匹配点,进而获取基材料分解投影。该算法避免了现有算法复杂的迭代优化过程,简化了系统的标定过程,分解精度取决于查找表的设定步长。相对现有算法该算法有实现过程简单、易于并行计算的优点。仿真实验结果验证了算法的有效性。

关键词 X 射线光学; 双能计算机层析成像; 投影匹配; 投影分解; 预处理重建

中图分类号 TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0311002

Projection Decomposition Algorithm of X-Ray Dual-Energy Computed Tomography Based on Projection Matching

Li Baolei^{1,2} Zhang Yaojun¹

(¹ *The First Research Institute of Ministry of Public Security, Beijing 100048, China*)
(² *School of Mathematical Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract X-ray dual-energy computed tomography imaging technique is an important material detection and recognition method in the field of security inspection. The projection decomposition is the nuclear content and key technique in the pre-reconstruction algorithm of dual-energy computed tomography. According to the disadvantages of the current algorithms, a projection decomposition algorithm based on projection matching is proposed. Firstly, based on energy spectrum of the system and the linear attenuation coefficient curve of the basic materials, the high-and low-energy projection lookup table can be got by solving the projection integral equations set. For a given dual-energy projection, find the best match point in the lookup table and then obtain the decomposition projection of basic materials. The proposed algorithm avoids the process of complex iteration and optimization and simplifies the process of system calibration. The decomposition accuracy depends on the step setting of lookup table. Compared to the current algorithms, the proposed algorithm's realization is more simple and easy for parallel computation. The feasibility of the algorithm is validated by the results of simulation experiment.

Key words X-ray optics; dual-energy computed tomography; projection matching; projection decomposition; pre-reconstruction

OCIS codes 110.0110; 340.0340; 020.0020; 250.0250

1 引 言

X 射线双能计算机断层成像(CT)作为一种重要的成像技术,在安全检查领域起着越来越重要的作用^[1~3]。在常见的 X 射线安全检查技术中(主要

包括单能 X 射线透视、双能 X 射线透视、多视角、背散射和 X 射线 CT 技术等),双能 CT 技术具有较高的探测能力,它能够较准确的获取材料的电子密度、有效原子序数二维信息,而利用此二维信息能够实

收稿日期: 2010-06-10; 收到修改稿日期: 2010-11-30

基金项目: 国家科技支撑计划(2009BAK64B02)资助课题。

作者简介: 李保磊(1980—),男,博士,主要从事 X 射线计算机断层成像技术及其应用等方面的研究。

E-mail: baolei_li@yahoo.com.cn

现对绝大部分材料的探测识别^[4]。同时 CT 型安检设备也是美国 FAA 唯一认定的 EDS 型安检设备。可见双能 CT 技术在整个 X 射线安检技术中的地位。

双能 CT 的概念在 20 世纪 70 年代由 Robert E. Alvarez 等^[5]首次提出并进行了研究。最初该项技术主要用于医学射线图像的骨骼与软组织的分离和病灶诊断,之后其应用逐渐扩展到工业检测和安全检查领域,如利用双能技术对 CT 图像进行射束硬化校正等。在安全检查领域,国外 Reveal 和 Analogic 公司均已推出自己的双能 CT 行包检查系统^[6,7]。

双能 CT 安检系统的核心技术是双能 CT 重建算法。双能 CT 重建算法大致可以分为三类。1) 迭代重建算法^[8,9]。这类方法通过迭代的过程,得到与能谱无关或者近似无关的 CT 图像,进而抑制由射束硬化效应带来的伪影,改善图像质量;或者通过双能迭代,得到材料分解图像。不过此类方法计算速度慢,不易实际应用。2) 后处理重建算法^[10~12]。该方法首先利用高低能投影重建出高低能 CT 图像,然后再对高低能 CT 图像进行处理,获取物体断层的物理参数分布图像。由于其自身固有的特点,此类方法不能从根本上消除射束硬化效应,因此精度难以保证。3) 基于投影分解的双能 CT 重建算法^[13~16]。对于这类方法,基于两种常见的物质线性衰减系数分解模型——双效应分解模型和基材料分解模型^[13,17],对应着两种投影分解过程。这类方法通过对投影数据的预处理分解,利用分解的参数完成双能 CT 重建进而对材料进行识别探测,因此又称为预处理重建算法。这种算法理论上可以得到不受能谱影响的物质有效原子序数和电子密度图像,是目前双能 CT 技术领域的主流重建算法。

在预处理重建算法中,投影分解是关键技术和核心内容,现有文献中已有多种投影分解方法,如多项式间接拟合法、多项式直接拟合法、分段多项式拟合法、等值线法和高次曲面函数拟合法等^[16,18]。这些方法在一定程度上促进了双能 CT 技术的发展,

但是它们求解过程复杂,需要复杂的标定过程,计算速度慢,对噪声十分敏感,分解精度还有待提高。2006 年,Zhengrong Ying 等^[19,20]提出了双能 CT 的优化投影分解方法,提高了分解算法的稳定度和收敛性能,但是仍然存在计算速度与初值的选取问题。总之,现有投影分解方法还不能满足安检实际需求,需要研究简便实用的投影分解算法。

2 双能 CT 重建原理

物质的线性衰减系数有两种常见的分解模型:

$$\mu(E) = a_c f_{\text{KN}}(E) + a_p f_p(E), \quad (1)$$

$$\mu(E) = b_1 \mu_1(E) + b_2 \mu_2(E), \quad (2)$$

式中 $f_p(E), f_{\text{KN}}(E)$ 为只与能量 E 有关而与材质无关的分解系数。且有

$$f_p(E) = \frac{1}{E^3}, \quad (3)$$

$$f_{\text{KN}}(\alpha) = \frac{1+\alpha}{\alpha^2} \left[\frac{2(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \frac{1}{\alpha} \ln(1+2\alpha) \right] + \frac{1}{2\alpha} \ln(1+2\alpha) - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^2}, \quad (4)$$

式中 $\alpha = E/510.975 \text{ keV}$, a_p 表示光电效应系数, a_c 为康普顿散射效应系数, a_p, a_c 是独立于能量只与材质有关的物理量,且有

$$a_p = l_1 \frac{\rho Z^n}{A}, \quad a_c = l_2 \frac{\rho Z}{A}, \quad n \approx 4 \sim 5, \quad (5)$$

式中 l_1, l_2 为两常数, ρ 为物质密度, Z 为原子序数, A 为原子量; $\mu_1(E), \mu_2(E)$ 分别为两种基材料的线性衰减系数。 b_1, b_2 为对应两种基材料的分解系数,对于某一固定的物质, b_1, b_2 是两个常数。(1)式表示在一定的射线能量范围内,物质的衰减可由光电效应和康普顿散射两种作用共同组成。(2)式表示任何一种物质的线性衰减系数都可由两种基材料的线性衰减系数线性叠加而成^[13,17]。

依据这两种衰减系数分解模型,记

$A_c = \int a_c dl, A_p = \int a_p dl; B_1 = \int b_1 dl, B_2 = \int b_2 dl,$ 根据宽能谱射线条件下的 Beer 定律可得

$$\begin{cases} P_L = -\ln \left\{ S_L(E) \exp[-A_c f_{\text{KN}}(E) - A_p f_p(E)] dE \right\} + \ln \int S_L(E) dE \\ P_H = -\ln \left\{ S_H(E) \exp[-A_c f_{\text{KN}}(E) - A_p f_p(E)] dE \right\} + \ln \int S_H(E) dE \end{cases}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} P_L = -\ln \left\{ S_L(E) \exp[-B_1 \mu_1(E) - B_2 \mu_2(E)] dE \right\} + \ln \int S_L(E) dE \\ P_H = -\ln \left\{ S_H(E) \exp[-B_1 \mu_1(E) - B_2 \mu_2(E)] dE \right\} + \ln \int S_H(E) dE \end{cases}, \quad (7)$$

式中 $S_L(E), S_H(E), P_L, P_H$ 分别为高低能谱和高低能投影。基于投影分解的双能 CT 预处理重建算法的核心即为(6)式或者(7)式的求解,即根据(6), (7)式求解 $A_c, A_p; B_1, B_2$, 我们称这个过程为投影分解过程。由于 A_c, A_p, B_1, B_2 为 a_c, a_p, b_1, b_2 的线积分投影值, 求解出 $A_c = \int a_c dl, A_p = \int a_p dl; B_1 = \int b_1 dl, B_2 = \int b_2 dl$ 后, 根据 CT 原理, 利用滤波反投影重建算法, 便可计算出 a_c, a_p, b_1, b_2 , 由此可以计算材质的等效原子序数和电子密度信息, 以完成材料的探测识别。计算公式为^[5,21]

$$Z_{\text{eff}} = K_1 \left(\frac{a_p}{a_c} \right)^{1/n}, \quad (8)$$

$$\rho_e = K_2 a_c, \quad (9)$$

式中 K_1, K_2 为两常数, $n \approx 3 \sim 4$, 且

$$Z_{\text{eff}} = \left(\frac{b_1 \rho_{e1} Z_1^n + b_2 \rho_{e2} Z_2^n}{b_1 \rho_{e1} + b_2 \rho_{e2}} \right)^{1/n}, \quad (10)$$

$$\rho_e = b_1 \rho_{e1} + b_2 \rho_{e2}, \quad (11)$$

式中 Z_1, Z_2 分别为两种基材料的原子序数; ρ_{e1}, ρ_{e2} 分别为两种基材料的电子密度^[21]。

3 基于投影匹配的双能 CT 投影分解算法

依据(6), (7)式的相似性, 不失一般性, 投影分解算法以基材料模型为例, 即对(7)式进行求解。

现有投影分解算法多对(7)式做正向优化求解, 过程复杂。这里提出的分解方法和现有方法的思路相反。算法的思想是: 首先依据 CT 系统能谱信息生成合理物理意义范围内的各种 B_1, B_2 数值对应的 P_L, P_H , 建立数据查找表。而后再根据实际得到的 P_L, P_H 去匹配查找表中与之吻合的高低能投影, 同时获取对应的 B_1, B_2 值。该投影分解算法的步骤如下:

1) 查找表生成

设 B_1, B_2 范围为 $B_1 \in [B_{1\min}, B_{1\max}], B_2 \in [B_{2\min}, B_{2\max}]$ 。设定一定的步长 d , 生成 B_1, B_2 数值序列 $B_1(i), B_2(j), i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N$, 依据系统能谱和(7)式生成高低能投影序列:

$$P_L(i, j) \quad i = 1, 2, \dots, M; \quad j = 1, 2, \dots, N,$$

$$P_H(i, j) \quad i = 1, 2, \dots, M; \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (12)$$

建立高低能投影 $P_L(i, j), P_H(i, j)$ 和 $B_1(i), B_2(j)$ 数据查找表, 一对 $P_L(i, j), P_H(i, j)$ 对应着一对 $B_1(i), B_2(j)$ 。

2) 投影匹配

给定实际得到的高低能投影 \tilde{P}_L, \tilde{P}_H , 寻找 $i = i_0, j = j_0$, 使得 $[P_L(i, j) - \tilde{P}_L]^2 + [P_H(i, j) - \tilde{P}_H]^2$ 的值最小, 即

$$[P_L(i_0, j_0) - \tilde{P}_L]^2 + [P_H(i_0, j_0) - \tilde{P}_H]^2 = \min \{ [P_L(i, j) - \tilde{P}_L]^2 + [P_H(i, j) - \tilde{P}_H]^2 \}, \quad (13)$$

也就是说投影 \tilde{P}_L, \tilde{P}_H 在查找表中找到了最佳匹配点。

3) 计算 \tilde{P}_L, \tilde{P}_H 对应的分解投影 $\tilde{B}_1(i), \tilde{B}_2(j)$

$$\tilde{B}_1(i) = B_{1\min} + (i_0 - 1) \cdot d;$$

$$\tilde{B}_2(j) = B_{2\min} + (j_0 - 1) \cdot d. \quad (14)$$

可以看出, 算法没有根据 P_L, P_H 通过复杂的过程逆向求解, 而采用了正向投影匹配的方法实现了 B_1, B_2 的求解。使得投影分解过程简单且易于实现。值得指出, B_1, B_2 的步长越小, 算法的精度就越高。而且, 可以将利用文中方法得到的分解结果作为非线性最小二乘方法的初值, 由于初值已逼近理论值, 这样就可以得到稳定收敛的解。从这个角度分析, 本文方法也有其理论与现实意义。算法的流程图如图 1 所示。

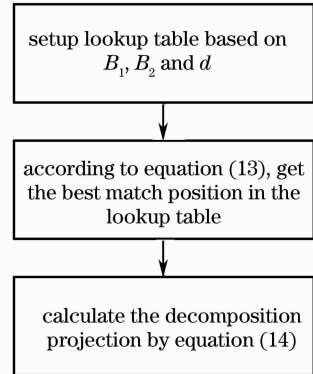


图 1 双能计算机层析成像投影分解算法流程图

Fig. 1 Flow chart of projection decomposition algorithm of X-ray dual-energy computed tomography

4 仿真实验结果

4.1 系统能谱及查找表建立

仿真实验采用的高低能峰值管电压分别为 80 kV 和 140 kV, 并假设探测器响应理想线性, 系统能谱由开源能谱生成程序 SpectrumGUI 生成^[22], 如图 2 所示。

设定基材料为碳和铝, 且设定

$$B_{1\min} = 0, B_{1\max} = 10.0 \text{ cm}$$

$$B_{2\min} = 0, B_{2\max} = 10.0 \text{ cm}, d = 0.001 \text{ cm} \quad (15)$$

依据(7)式生成数据查找表。如图 3 所示。

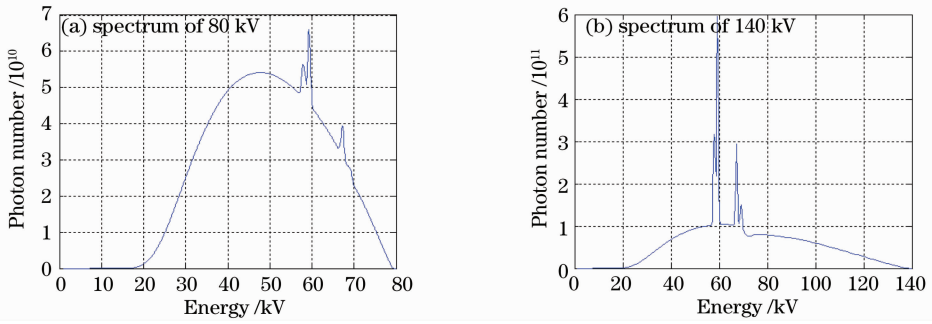


图 2 仿真系统能谱

Fig. 2 Simulated energy spectrum of system

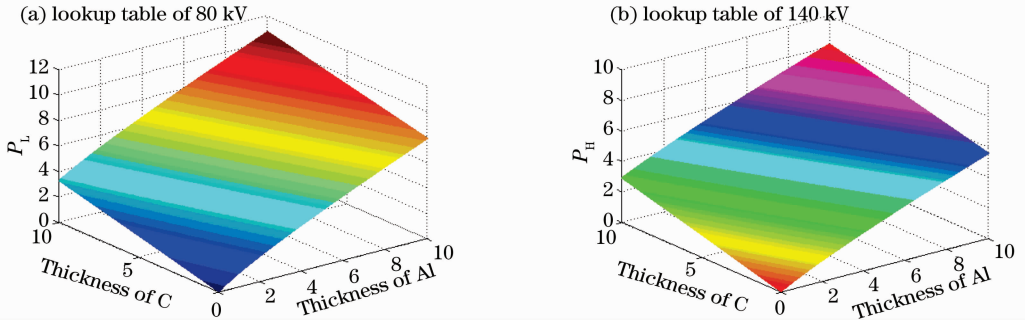


图 3 数据查找表

Fig. 3 Data lookup table

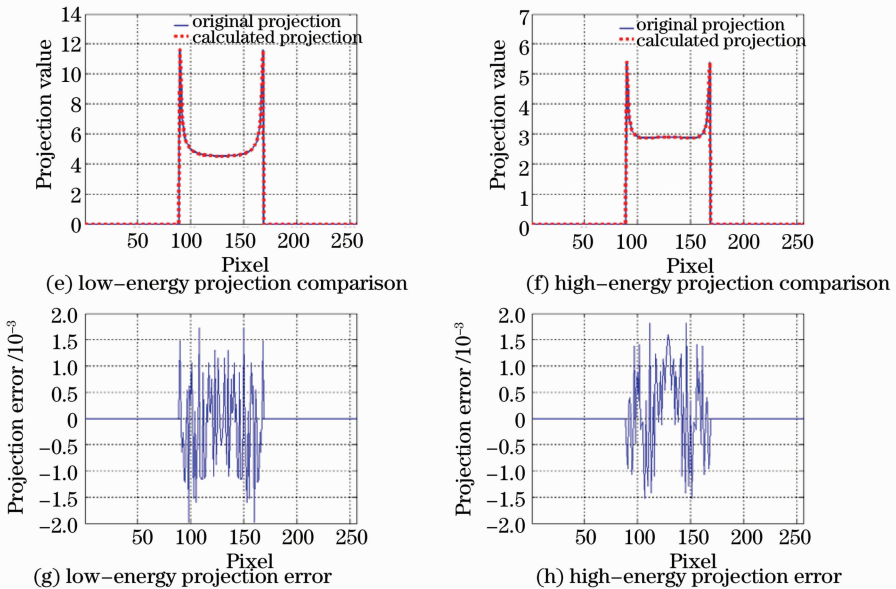
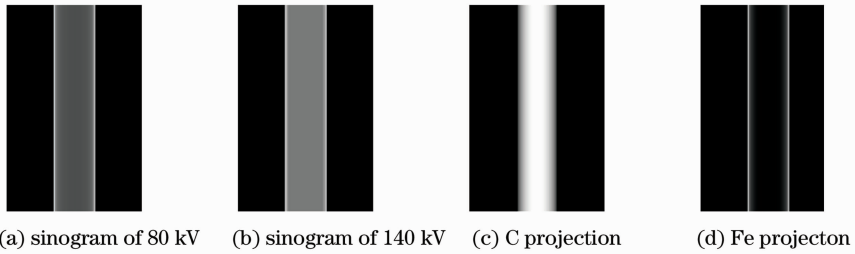


图 4 实验 1 的实验结果

Fig. 4 Results of experiment 1

4.2 仿真实验 1

依据上述双能实验条件,对外层为 1.28 m 厚度 Fe、内层为直径 76.8 mm 水的圆柱体作双能扫描。其中探测器 256 pixel,像素间隔 1 mm;焦距 590 mm。根据(7)式生成高低能投影,其中水和 Fe 的线性衰减系数可由 NIST 数据库得到^[23]。选择碳 C 和铁 Fe 作为基材料,设 $d=0.01$ cm,利用本文提出的算法,得到如图 4 所示实验结果。实验过程中,首先进行投影分解得到分解 C 投影和 Fe 投影,然后再根据(7)式计算高低能投影值,将计算的高低能投影值与原始高低能投影值作对比,以检验分解

算法的有效性。

4.3 仿真实验 2

为了考察算法对材料探测的有效性,依据仿真实验 1 实验条件对外层为 0.64 cm 厚度 Al、内层为直径 5.12 cm Mg 柱的圆柱体作双能 CT 断层扫描,以 C 和 Al 作为基材料,设 $d=0.001$ cm。利用本文提出的算法,得到如图 5 所示实验结果。计算过程中(10)式中 n 取 3.5,其中图 5(i),图 5(j)中的曲线为图 5(g),图 5(h)中所示的横线处有效原子序数和电子密度与真实值的对比。

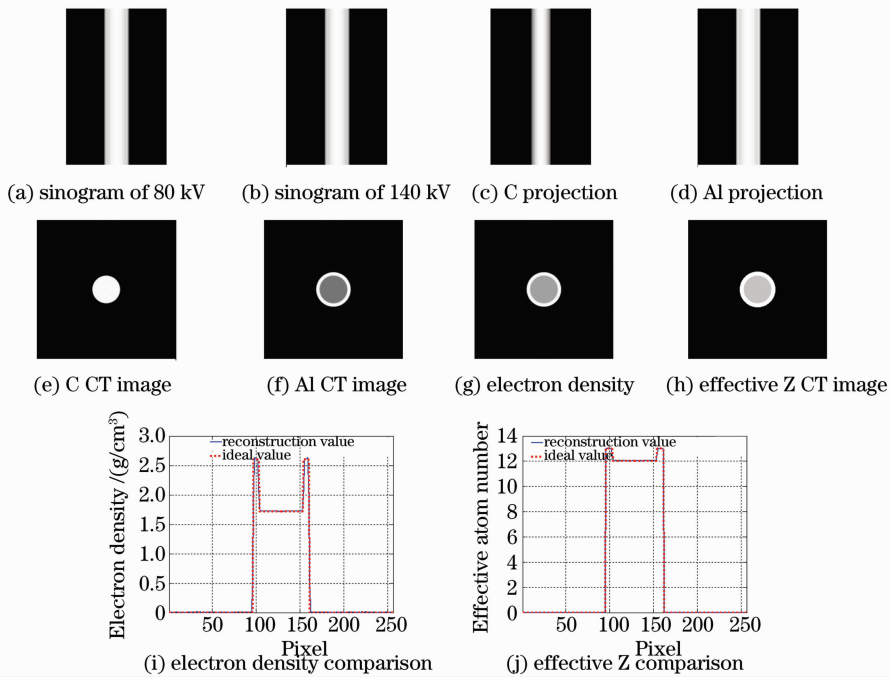


图 5 实验 2 的实验结果

Fig. 5 Results of experiment 2

从上面的仿真实验可以看出,利用所提出的投影分解算法进行双能投影分解,通过分解投影计算的高低能投影与原高低能投影高度吻合,这也证明了算法的有效性。同时,利用提出的投影分解算法进行双能 CT 重建,获取的材料电子密度和有效原子序数和理想真实值十分吻合,经计算可知误差在 0.5% 以内,满足材料探测需求。另外,在寻找最佳匹配点时,由于算法自身的特点和结构,十分适合并行计算,这也为算法速度的提高奠定了基础。相反迭代算法^[20]则难以实现并行计算。同时在迭代算法的计算过程中,收敛结果对迭代初值的依赖性很大,如果初值设置不当,会导致算法不收敛或者出现错误的结果。而本文算法则不可能出现这样的情况,

始终可以得到稳定的解。

5 结 论

提出了一种基于投影匹配的双能 CT 投影分解算法,该算法相对现有算法,实现过程简单,易于并行运算,实际仿真实验结果验证了算法的有效性。另外,在实际双能 CT 系统中,无须每次扫描均用本文中的算法进行投影分解,而可以事先用所建立高低能投影到分解投影的数据查找表,此为系统标定过程。显然,相比现有的算法,该算法简化了系统的标定过程。而对于实际获取的高低能投影,基于查找表利用线性插值的方法即可得到对应的分解投影,这样可以保证双能 CT 系统在实际进行物体材

料探测时的高效性。

参 考 文 献

- 1 Li Baolei, Yang Min, Fu Jian *et al.*. Two ring artifact correction methods for computed tomography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1849~1853
李保磊, 杨 民, 傅 健 等. 两种 CT 成像环状伪影抑制方法 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1849~1853
- 2 Fang Zheng, Sun Xiaomin, Luo Qingming. New simple method of X-ray beam hardening correction for CT reconstruction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 302~306
方 正, 孙小敏, 骆清铭. 一种简便的计算机层析系统 X 射线硬化校正方法 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 302~306
- 3 Chen Xin, Sun Yi, Zhu Peiping. Reconstruction algorithm of cone-beam phase X-ray computer-tomography based on grating imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1079~1084
陈 欣, 孙 怡, 朱佩平. 光栅成像的锥束相位 CT 重建算法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1079~1084
- 4 R. F. Eilbert, K. D. Krug. Aspects of image recognition in vivid technology's dual-energy X-ray system for explosive detection [C]. *SPIE*, 1992, **1824**: 127~143
- 5 R. Alvarez, A. Macovski. Energy-selective reconstructions in X-ray computerized tomography [J]. *Phys. Med. Biol.*, 1976, **21**(5): 733~744
- 6 <http://www.revealimaging.com/>, 2009. 10. 8
- 7 <http://www.analogic.com/>, 2009. 10. 8
- 8 J. A. Fessler, I. Elbakri, P. Sukovic *et al.*. Maximum-likelihood dual-energy tomographic image reconstruction [C]. *SPIE*, 2002, **4684**: 38~49
- 9 P. Sukovic, N. H. Clinthorne. Penalized weighted least-squares image reconstruction for dual energy X-ray transmission tomography [J]. *IEEE Trans. Med. Imag.*, 2000, **19**(11): 1075~1081
- 10 G. Christ. Exact treatment of the dual-energy method in CT using polyenergetic X-ray spectra [J]. *Phys. Med. Biol.*, 1984, **29**(12): 1501~1510
- 11 J. C. M. Steenbeek, C. van Kuijk, J. L. Grashuis. Selection of fat-equivalent materials in postprocessing dual-energy quantitative CT [J]. *Med. Phys.*, 1992, **19**(4): 1051~1056
- 12 M. M. Goodsitt. Beam hardening errors in post-processing dual energy quantitative computed tomography [J]. *Med. Phys.*, 1995, **22**(7): 1039~1047
- 13 J. Peter Stonestrom, R. Alvarez, A. Macovski. A framework for spectral artifact corrections in X-ray CT [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1981, **28**(2): 128~141
- 14 K. S. Chuang, H. K. Huang. A fast dual-energy computational method using iso-transmission lines and table lookup [J]. *Med. Phys.*, 1987, **14**(2): 186~192
- 15 R. E. Alvarez, J. A. Seibert, S. K. Thompson. Comparison of dual energy detector system performance [J]. *Med. Phys.*, 2004, **31**(3): 556~565
- 16 H. N. Cardinal, A. Fenster. An accurate method for direct dual-energy calibration and decomposition [J]. *Med. Phys.*, 1990, **17**(3): 327~341
- 17 W. A. Kalender, W. H. Perman, J. R. Vetter *et al.*. Evaluation of a prototype dual-energy computed tomographic apparatus. I. Phantom studies [J]. *Med. Phys.*, 1986, **13**(3): 334~339
- 18 K. S. Chuang, H. K. Huang. Comparison of four dual energy image decomposition methods [J]. *Phys. Med. Biol.*, 1988, **33**(4): 455~466
- 19 Z. R. Ying, R. Naidu, K. Guilbert *et al.*. Dual energy volumetric X-ray tomographic sensor for luggage screening [C]. Proceedings of IEEE Sensors Applications Symposium, 2007, (6-8): 1~6
- 20 Z. R. Ying, R. Naidu, C. R. Crawford. Dual energy computed tomography for explosive detection [J]. *J. X-ray Science and Technology*, 2006, **14**(4): 235~256
- 21 Guowei Zhang, Jianping Cheng, Li Zhang *et al.*. A practical reconstruction method for dual energy computed tomography [J]. *J. X-Ray Science and Technology*, 2008, **16**(2): 67~88
- 22 <http://sourceforge.net/projects/spectrumgui/>, 2009. 12. 18
- 23 <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/Cover.html>, 2009. 12. 18