

X 射线双能计算机层析成像投影分解的优化迭代方法

李保磊, 张萍宇, 李 斌, 莫 阳, 孟 博, 张耀军

公安部第一研究所安检事业部, 北京 100048

摘要 双能计算机层析成像(CT)投影分解是双能 CT 预处理重建算法的关键步骤,在采用迭代算法求解双能投影积分方程组时,迭代初值的选择对迭代的收敛性影响很大。为了解决双能投影积分方程组迭代求解的初值选择问题,提出一种优化迭代算法。该算法在计算双能基材料投影查找表以及进行系统标定时,依据高低能投影数据的数值范围,设置一定的步长,按照高低能投影值的大小依次求解对应的基材料投影,并以上次的收敛结果作为下次迭代的初值。结果表明,该优化迭代算法有效改善了迭代的收敛性,提高了双能 CT 系统标定的效率,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; 投影分解; 迭代; 收敛性; 优化

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1034001

Optimized Iterative Method for Projection Decomposition of X-Ray Dual-Energy Computed Tomography

Li Baolei, Zhang Pingyu, Li Bin, Mo Yang, Meng Bo, Zhang Yaojun

Security Inspection Division, First Research Institute of the Ministry of Public Security of PRC, Beijing 100048, China

Abstract Projection decomposition of dual-energy computed tomography (CT) is a key step for dual-energy CT pre-reconstruction algorithm. The selection of iterative initial values has great influence on the convergence of the iteration when an iterative algorithm is use to solve the dual-energy projection integral equations. To solve the problem of selecting initial values in solving dual-energy projection integral equations, an optimized iterative algorithm is proposed. For calculating projection lookup tables of dual-energy basis materials and calibrating the system, a certain step length is set based on numerical ranges of high-energy and low-energy projection data. Thus the corresponding basis materials projection can be solved according to the order of the projection values. The convergent result of last time is taken as the initial value of next iteration. The results show that the proposed algorithm can effectively improve the convergence of the iteration and the efficiency of calibration of the dual-energy CT system, which proves the validity of the algorithm.

Key words X-ray optics; dual-energy computed tomography; projection decomposition; iteration; convergence; optimization

OCIS codes 340.7440; 110.6960; 170.7440

1 引 言

双能计算机层析成像(CT)重建算法大致可以分为 3 类。第 1 类是迭代重建算法^[1-3],即对双能投影数据采用迭代重建技术获取断层图像的方法;此类方法计算速度慢,不宜实际应用,目前很少有双能 CT 设备采用此类方法。第 2 类是后处理重建算法^[4-6],该算法首先利用高低能投影重建高低能 CT 图像,然后对高低能 CT 图像进行处理,获取物体断层的物理参数分布图像;此类算法不能从根本上消除射束硬化效应,因此重建精度难以保证。第 3 类是基于投影分解的双能 CT 预处理重建算法;基于 2 种常见的物

收稿日期: 2017-04-12; **收到修改稿日期:** 2017-05-23

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国民用航空总局联合研究基金(U1533124)

作者简介: 李保磊(1980—),男,博士,副研究员,主要从事 X 射线计算机层析成像(CT)安全检查技术与装备方面的研究。E-mail: baolei_li@alijun.com

质线性衰减系数分解模型——基效应分解模型和基材料分解模型,此类算法对应 2 种投影分解过程,在理论上可以得到不受能谱影响的材料的等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。

在双能预处理重建算法中,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。Alvarez 等^[7]提出多项式拟合法,该方法采用多项式拟合技术首先将双能投影积分方程组转化为多项式方程组,然后再通过 Newton-Raphson 方法求解多项式方程组得到基材料(基效应)投影分量。该方法需要 2 次迭代过程,实现过程繁琐。采用多项式拟合法将基材料(基效应)投影直接表示为高低能投影的多项式函数,可以简化计算过程,但是精度难以保证^[8]。为了对该算法进行改进,Chuang 等^[9]利用分段多项式拟合法来进一步提高拟合精度。Chuang 等^[10]还提出了等透射线法来进行投影分解,采用该方法进行少量的标定后,对于给定的高低能投影,只需要进行简单的线性插值即可完成双能投影分解,但是该方法在制作等值线时进行了近似假设,即高低能投影值等于 2 种基材料厚度的线性组合,而这种假设只有在射线为单色时才是严格成立的。Cardinal 等^[11-12]提出利用二次和三次曲面函数来逼近分解投影关于高低能投影的函数,该方法实际上是对直接多项式拟合方法的改进。Tang 等^[13]提出利用 Newton 迭代算法求解投影积分方程组的方法。Zou 等^[14]对双能投影积分方程组进行简化处理,建立了一个求解分解投影的迭代公式,通过迭代计算完成双能投影分解。Coleman 等^[15]通过多项式拟合的方法,将分解投影表示为关于高能投影的一元多项式函数和关于低能投影数据的一元多项式函数之和,即二者组成的二元多项式中没有交叉项。Baer 等^[16]对文献^[15]中的方法进行改进,在二元多项式中加入了交叉项,取得了较好的效果。Ying 等^[17-18]提出了双能 CT 优化投影分解方法,该方法采用等值线方法将二元优化问题转化为一元优化问题,改善了分解算法的稳定性和收敛性,但是仍然存在计算速度与初值的选取问题。Zhang 等^[19]基于文献^[17-18]中的方法,利用双能 CT 技术对液体燃爆物进行了探测。Naidu 等^[20]提出采用分步拟合的方法进行双能分解,该方法需要 2 次多项式拟合过程,实现过程比文献^[17-18]中方法的实现过程更复杂。李保磊等^[21]提出了一种基于投影匹配的双能 CT 投影分解算法,但该算法的执行效率较低。李磊等^[22]提出了一种基于等值线拟合的 X 射线双能 CT 快速投影分解算法,在一定程度上提高了计算速度。

上述投影分解方法在一定程度上促进了双能 CT 技术的发展,但是这些算法求解过程复杂,计算速度慢,分解精度有待提高,不能满足安检的实际需求,需要研究更加简便、实用的投影分解算法。鉴于此,本文提出一种双能 CT 投影分解优化迭代算法,该算法可以有效改善投影分解迭代的收敛性,提高双能 CT 系统标定的效率。

2 双能 CT 重建原理

当射线能量 E 小于 200 keV 时,射线与物质的相互作用由康普顿散射和光电效应支配。物质的线性衰减系数 $\mu(E)$ 有如下近似模型^[7]:

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

式中 $f_p(E)$ 和 $f_{kn}(E)$ 为仅与能量有关而与材质无关的分解系数, a_p 和 a_c 为仅与材质有关而与能量无关的光电效应系数和康普顿散射效应系数,且有

$$f_p(E) = \frac{1}{E^3}, \quad (2)$$

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

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

$$a_c = l_2 \frac{\rho Z}{A}, \quad (5)$$

式中 $\alpha = E/510.975$ keV, l_1, l_2 均为常数, ρ 为物质的密度, Z 为原子序数, A 为相对原子质量。此模型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 2 种作用共同决定。此模型通常称为基

效应模型,也称双效应模型。

与基效应模型对应的还有一种关于物质衰减系数的物理模型——基材料模型:

$$\mu(E) = b_1\mu_1(E) + b_2\mu_2(E), \quad (6)$$

式中 $\mu_1(E)$ 、 $\mu_2(E)$ 为对应 2 种基材料的线性衰减系数; b_1 、 b_2 为对应 2 种基材料的分解系数,对于某一固定的物质, b_1 、 b_2 均为常数。(6)式表示任何一种物质的线性衰减系数都可由 2 种基材料的线性衰减系数线性叠加而成。可以证明,基效应模型和基材料模型这 2 种物理模型是统一的,由基效应模型可以推导出基材料模型。

根据上述 2 种衰减系数分解模型,记 $A_c = \int a_c dl$, $A_p = \int a_p dl$; $B_1 = \int b_1 dl$, $B_2 = \int b_2 dl$ (l 为射线穿过物体的路径)。根据宽能谱射线条件下的 Beer 定律,可得到式(7)、(8)所示的基于基效应模型、基材料模型的高低能投影:

$$\begin{cases} P_{\text{inf}} = -\ln\left\{\int S_{\text{inf}}(E)\exp[-A_c f_{\text{kn}}(E) - A_p f_p(E)]dE\right\} + \ln\left[\int S_{\text{inf}}(E)dE\right] \\ P_{\text{sup}} = -\ln\left\{\int S_{\text{sup}}(E)\exp[-A_c f_{\text{kn}}(E) - A_p f_p(E)]dE\right\} + \ln\left[\int S_{\text{sup}}(E)dE\right] \end{cases}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} P_{\text{inf}} = -\ln\left\{\int S_{\text{inf}}(E)\exp[-B_1\mu_1(E) - B_2\mu_2(E)]dE\right\} + \ln\left[\int S_{\text{inf}}(E)dE\right] \\ P_{\text{sup}} = -\ln\left\{\int S_{\text{sup}}(E)\exp[-B_1\mu_1(E) - B_2\mu_2(E)]dE\right\} + \ln\left[\int S_{\text{sup}}(E)dE\right] \end{cases}, \quad (8)$$

式中 $S_{\text{sup}}(E)$ 、 $S_{\text{inf}}(E)$ 为高低能系统能谱, P_{sup} 、 P_{inf} 为高低能投影。基于投影分解的双能 CT 预处理重建算法的核心即为(7)式或(8)式的求解,即根据(7)式或(8)式求解 A_c 、 A_p 、 B_1 、 B_2 ,称该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,因此求解出 A_c 、 A_p 、 B_1 、 B_2 后,根据 CT 重建的原理,利用滤波反投影图像重建算法,便可计算出 a_c 、 a_p 、 b_1 、 b_2 ,从而可以计算出材料的等效原子序数 Z_{eff} 和电子密度 ρ_e ,进而完成材料的探测识别。基效应模型和基材料模型中 Z_{eff} 和 ρ_e 的计算公式^[7,19]如下:

$$Z_{\text{eff}} = K_1 \left[\frac{a_p}{a_c} \right]^{\frac{1}{n}}, \quad n = 3 \sim 4, \quad (9)$$

$$\rho_e = K_2 a_c, \quad (10)$$

$$Z_{\text{eff}} = \left(\frac{b_1 \rho_{e1} Z_1^n + b_2 \rho_{e2} Z_2^n}{b_1 \rho_{e1} + b_2 \rho_{e2}} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad n = 3 \sim 4, \quad (11)$$

$$\rho_e = b_1 \rho_{e1} + b_2 \rho_{e2}, \quad (12)$$

式中 K_1 、 K_2 均为常数, Z_1 、 Z_2 分别为 2 种基材料的原子序数, ρ_{e1} 、 ρ_{e2} 分别为 2 种基材料的电子密度。

由于基效应模型和基材料模型是统一的,采用任何一种模型均可完成双能 CT 重建,因此以下对双能 CT 预处理重建算法的研究以及数据处理均是基于基材料模型进行的。

3 双能投影分解优化迭代算法

双能预处理重建的核心步骤为双能投影积分方程组的求解,为了克服现有双能重建算法的缺点,满足实际工程应用,提出了一种投影分解优化迭代算法。该方法是对常规迭代算法的一种改进,旨在解决初值选取以及系统标定的计算速度。

3.1 初值的优化选择

利用双能预处理重建算法进行系统标定时,关键步骤为求解双能投影积分方程组:

$$\begin{cases} P_{\text{inf}} = P_{\text{inf}}(B_1, B_2) = -\ln\left\{\int S_{\text{inf}}(E)\exp[-B_1\mu_1(E) - B_2\mu_2(E)]dE\right\} + \ln\left[\int S_{\text{inf}}(E)dE\right] \\ P_{\text{sup}} = P_{\text{sup}}(B_1, B_2) = -\ln\left\{\int S_{\text{sup}}(E)\exp[-B_1\mu_1(E) - B_2\mu_2(E)]dE\right\} + \ln\left[\int S_{\text{sup}}(E)dE\right] \end{cases}. \quad (13)$$

根据最小二乘法优化的思想,可以将上述方程组的求解转化为无约束的二元非线性优化问题:

$$(B_1, B_2) = \operatorname{argmin}\{[P_{\text{inf}}(B_1, B_2) - P_{\text{inf}}]^2 + [P_{\text{sup}}(B_1, B_2) - P_{\text{sup}}]^2\}. \quad (14)$$

设 $F(B_1, B_2) = [P_{\text{inf}}(B_1, B_2) - P_{\text{inf}}]^2 + [P_{\text{sup}}(B_1, B_2) - P_{\text{sup}}]^2$, 则(14)式可简记为

$$(B_1, B_2) = \operatorname{argmin}[F(B_1, B_2)]. \quad (15)$$

上述非线性优化问题可以采用经典的非线性最小二乘法的 Levenberg-Marquardt 算法进行求解, 但是如果初值选取不当, 采用该方法依然会出现迭代不收敛的情况, 或者局部收敛值并非实际想得到的值。鉴于此, 设计了一种初值选择方法以优化现有的迭代算法。

根据双能 CT 重建的流程, 在计算双能基材料投影查找表以及进行系统标定时, 要依据高低能投影数据的数值范围设置一定的步长, 求解投影积分方程组。设高低能投影值的范围分别为 $P_{\text{inf}} \in [0, P_{\text{inf}}^{\text{max}}]$, $P_{\text{sup}} \in [0, P_{\text{sup}}^{\text{max}}]$, 设置步长为 d , 设 $M = P_{\text{inf}}^{\text{max}}/d$, $N = P_{\text{sup}}^{\text{max}}/d$, 即

$$\begin{cases} P_{\text{inf}} = 0, d, 2d, \dots, Md \\ P_{\text{sup}} = 0, d, 2d, \dots, Nd \end{cases} \quad (16)$$

根据射线与物质的相互作用规律, 有 $P_{\text{inf}} \geq P_{\text{sup}}$ 。为了使采用 Levenberg-Marquardt 算法求解双能优化问题具有更好的收敛性, 初值的选取应尽量接近于目标收敛值。基于此, 设计如图 1 所示的初值选择方法。

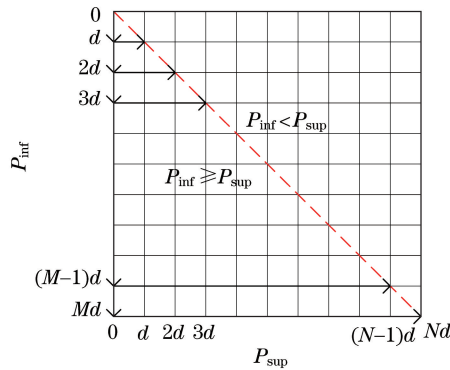


图 1 迭代初值选择方法示意图

Fig. 1 Schematic of initial value selection for iterative calculation

该方法的思想是按照高低能投影值的大小依次求解对应的基材料投影, 以上次的收敛结果作为下次迭代的初值, 以改善迭代的收敛性。具体步骤如下:

- 1) 依据设定的步长 d 对高低能投影值按从小到大的顺序排列, 并建立如图 1 所示的投影数据网格线。
- 2) 从投影对 $(P_{\text{inf}}, P_{\text{sup}}) = (0, 0)$ 开始标定计算。 $(P_{\text{inf}}, P_{\text{sup}}) = (0, 0)$ 时的收敛结果为 $(B_1, B_2) = (0, 0)$ 。
- 3) 判断 $P_{\text{inf}} \geq P_{\text{sup}}$ 是否成立。如果不成立, 则不进行此投影对的分解计算。反之按照图中箭头所示, 先按行从左到右确定迭代计算顺序, 换行时再按列从上到下依次进行迭代计算, 并将上次的迭代收敛结果作为下次迭代的初值。
- 4) 如果 $P_{\text{inf}} < P_{\text{sup}}$, 则设定

$$(B_1, B_2) = \operatorname{argmin}\{[P_{\text{inf}}(B_1, B_2) - P_{\text{inf}}]^2 + [P_{\text{sup}}(B_1, B_2) - P_{\text{sup}}]^2\}. \quad (17)$$

按照步骤 3) 所示的排序方法设定迭代顺序的原因是, 对于优化问题(17)式, 当 2 对高低能投影数值相近时, 迭代收敛值也应比较接近。这样就可以使迭代的初值尽可能地接近目标收敛值, 从而改善优化算法的收敛性。需要说明的是, 依据本研究的迭代初值选择思想, 还可以将迭代计算的顺序进行适当修改, 如先按列从上到下进行计算, 换列时再按行从左到右进行计算。总之, 最终目的是使 2 次迭代计算对应的高低能投影值尽可能接近。

3.2 初值优化实验

为了验证上述初值优化算法的有效性, 以某真双能 CT 系统标定为例, 按照系统标定流程建立系统查找表, 实验结果如图 2 所示。其中系统能谱由蒙特卡罗仿真软件 MCNP 仿真得到, 即通过计算射线源发射出的射线在探测器闪烁材料中的能量沉积得到系统能谱。与低能成像、高能成像对应的射线源峰值电压分别为 80 kV 和 160 kV。采用基材料模型, 选择基材料为碳(石墨, 密度为 1.699 g/cm^3)和铝。根据探测器的动态范围, 设定 $P_{\text{inf}}^{\text{max}} = P_{\text{sup}}^{\text{max}} = 10$, $d = 0.1 \text{ mm}$ 。

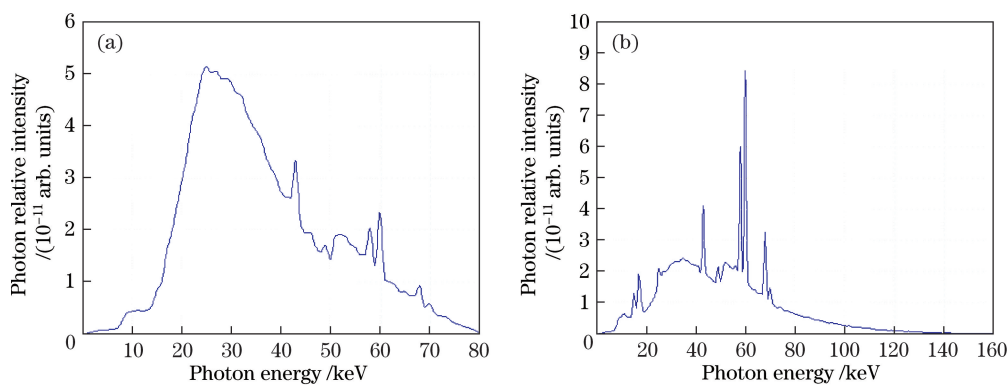


图 2 真双能 CT 系统的能谱。(a)低能能谱;(b)高能能谱

Fig. 2 Spectra of true dual-energy CT system. (a) Low energy spectrum; (b) high energy spectrum

真双能 CT 系统投影查找表图像如图 3 所示。与图 1 中高低能投影表示的方法相同,图像的横向代表高能投影值,纵向代表低能投影值,二者坐标对应的图像灰度代表基材料分解投影值。碳投影查找表图像的灰度显示窗口为 $[-117, 32]$,铝投影查找表图像的灰度显示窗口为 $[-5, 64]$ 。由图 3 可知,由未优化的迭代算法建立的投影查找表中有异常数据出现,如图 3(a)、(b)中椭圆内所示,此异常数据由初值选取不当导致的迭代收敛误差引起。优化初值的选取后消除了此异常数据。由此可见,优化后的迭代算法改善了迭代的收敛性。

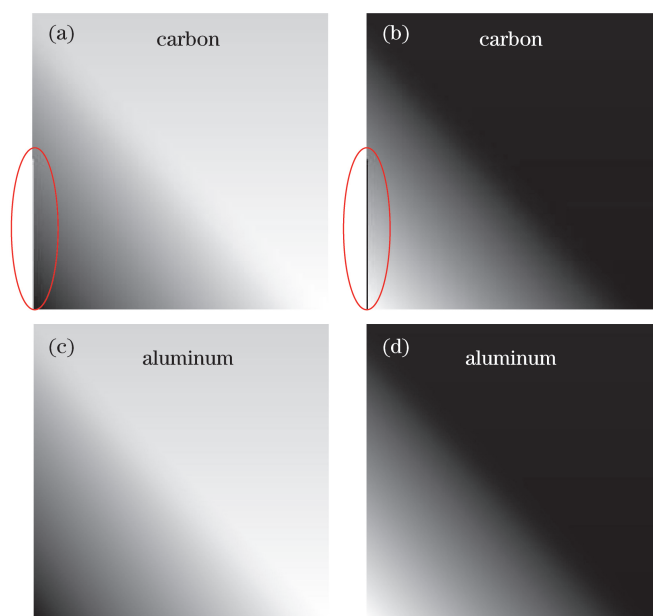


图 3 真双能 CT 系统投影查找表图像。(a)(b)未优化;(c)(d)优化后

Fig. 3 Projection lookup table images of true dual-energy CT system. (a)(b) Before optimization; (c)(d) after optimization

采用伪双能扫描模式对真双能 CT 系统扫描,系统能谱如图 4 所示,其中射线源管电压为 160 kV。

经过迭代计算可知,采用 3.1 节的初值选取方法仍然不能解决伪双能能谱条件下投影分解的迭代收敛问题。通过数据分析可知,当 P_{inf} 小于或等于 2.5 后,采用上述方法仍然可行,但是当 P_{inf} 大于 2.5 时,从 $(P_{inf}, P_{sup}) = (2.51, 0)$ 开始,多个高低能投影对不能找到对应的稳定收敛解。经分析可知,该现象由伪双能能谱的自身特性引起,相对于真双能成像,伪双能成像的高低能能谱的差异较小,导致优化问题的适定性较差,收敛值随 (P_{inf}, P_{sup}) 的变化波动较大,即使 (P_{inf}, P_{sup}) 的变化较小,优化问题的收敛也可能会引起大幅度波动,因此再利用 3.1 节中的初值选取方法可能导致选定的初值与目标收敛值相差很大。设定 $d = 0.01$ cm, (P_{inf}, P_{sup}) 小于或等于 2.5 的投影数据查找表如图 5 所示。碳投影查找表图像的灰度显示窗口为 $[-1200, 0]$,铝投影查找表图像的灰度显示窗口为 $[0, 720]$ 。

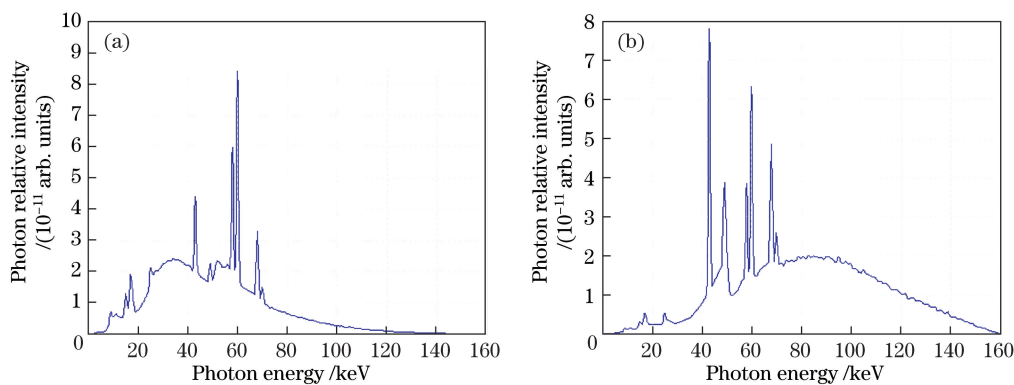


图 4 伪双能 CT 系统能谱。(a)低能能谱;(b)高能能谱

Fig. 4 Spectra of pseudo dual-energy CT system. (a) Low energy spectrum; (b) high energy spectrum



图 5 伪双能 CT 系统投影查找表图像。(a)碳;(b)铝

Fig. 5 Projection lookup table images of pseudo dual-energy CT system. (a) Carbon; (b) aluminum

图 6 所示为图 5 投影数据查找表中的部分投影曲线,即固定某些高能投影值,基材料投影随低能投影值的变化曲线。由图 6 可知,当高低能投影值相对差别较大时,基材料投影值随低能投影值的变化而迅速变化,数值变化的梯度较大,这是导致 3.1 节中初值选取方法失效的根本原因。综上所述可得出定性结论:当 P_{inf} 和 P_{sup} 的相对偏差较小时,优化算法的适应性较好;而当 P_{inf} 和 P_{sup} 的相对偏差较大时,适应性较差。

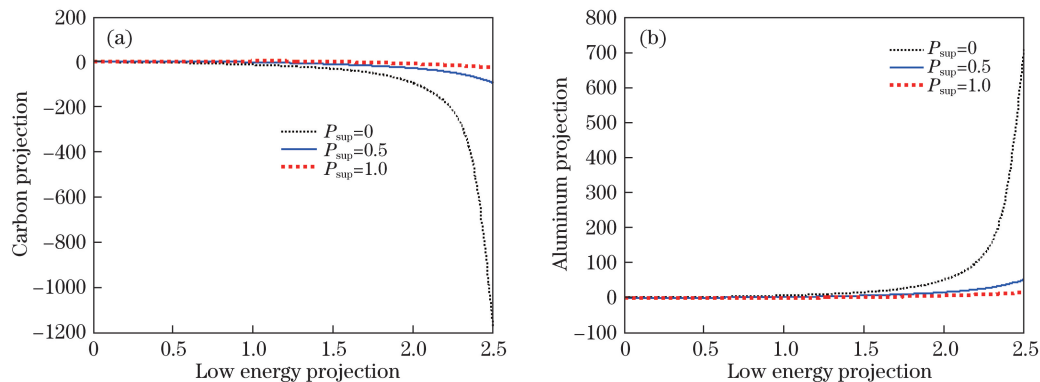


图 6 伪双能 CT 系统投影查找表灰度曲线。(a)碳;(b)铝

Fig. 6 Gray scale curves of projection lookup tables of pseudo dual-energy CT system. (a) Carbon; (b) aluminum

根据射线与物质的相互作用规律,当射线的高低能能谱确定时,检测物体的高低能投影值的二维分布应在一个合理的范围之内,而不是在坐标系中第一象限内随意分布。这种分布除了与射线源的能谱相关外,还与物质的原子序数直接相关。原子序数越小的物质,其高低能投影的差别越小。以真空为例,当射线照射真空时,高低能投影值相等。在实际工程中, P_{inf} 和 P_{sup} 相差较大的情况极其少见,原因是 P_{inf} 和 P_{sup} 为针对同一路径的投影值,对于常见的材质,依据高低能能谱,该投影值的比例应在一个合理的范围之内,而不是没有

限制,例如 $P_{inf}=2.5$ 和 $P_{sup}=0$ 虽然也能得到收敛解,但是现实中不存在这样的高低能投影对。

3.3 投影标定范围优化

对于给定的高低能能谱,原子序数较小的物质,其高低能投影差别较小,而原子序数较大的物质,其高低能投影差别较大。可以通过选择 2 种边界材料来限制系统标定过程中高低能投影的数据范围。依据实际情况,选定空气和某种高原子序数材料作为边界材料,双能投影标定范围优化示意图如图 7 所示。图中虚线表示空气对应的高低能投影曲线,由于空气的衰减系数很小,因此近似认为是真空,即高能投影和低能投影相等。图中实线表示某高原子序数材料的高低能投影曲线。处于 2 种边界材料投影曲线之间的即为实际有效的高低能投影数据的标定范围。设定了该范围后,再依据 3.1 节中的迭代方法以及初值选取方法进行系统标定,即可得到系统的投影数据查找表。

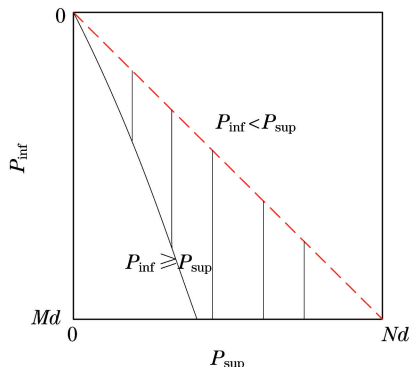


图 7 双能投影标定范围优化示意图

Fig. 7 Schematic of calibration scope optimization for dual-energy projection

根据实际工程经验,对于液体探测,常见的容器包装材料主要包括塑料、玻璃、陶瓷、金属铝和金属铁等。金属铜的原子序数高于金属铁的,它们的线性衰减系数如图 8 所示。为了保证投影数据标定范围的合理性和充分性,设定金属铜作为高原子序数材料来优化双能投影标定范围。当然也可以选择其他材料,例如比铜原子序数更大的元素,但是基于实际工程需求,液体包装容器采用更高原子序数材料的情形较为罕见,故做此选择。当检测对象改变时,例如利用双能 CT 技术对行李包裹进行安全检测,被检物材料的复杂性比液体的复杂性高得多,这种情况下,可以依据具体情况对边界材料的选定进行适当修改。对于 3.2 节所述真双能 CT 系统,金属铁和铜对应的高低能投影曲线如图 9 所示。

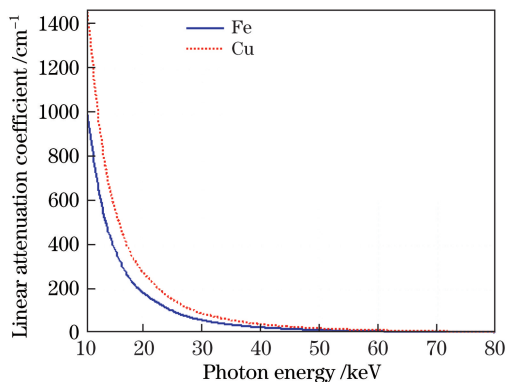


图 8 金属铁和铜的线性衰减系数曲线

Fig. 8 Linear attenuation coefficient curves of iron and copper

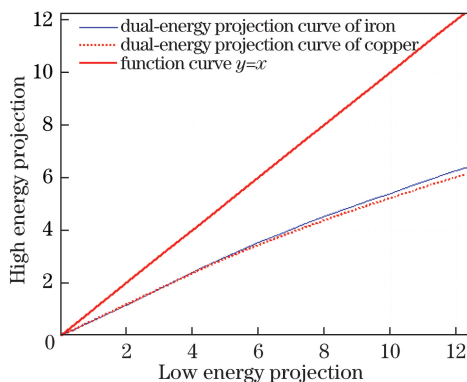


图 9 金属铁和铜的真双能投影曲线

Fig. 9 True dual-energy projection curves of iron and copper

4 优化迭代实验结果

4.1 真双能系统标定

对于 3.2 节所述真双能 CT 系统,依据如图 10 所示的金属铜的真双能投影曲线,可以得到优化了投影数据标定范围的基材投影查找表,如图 11 所示。图 11 中碳投影查找表图像的灰度显示窗口为 $[-46, 41]$,

铝投影查找表图像的灰度显示窗口为 $[-2.25, 32]$ 。利用实验室中的计算机可得到优化前后系统所需的标定时间分别为 2713.6, 1153.8 s, 标定范围优化算法使系统的标定速度提高了 1.35 倍。由此可见, 优化高低能投影数据的标定范围可以有效提高系统的标定速度。

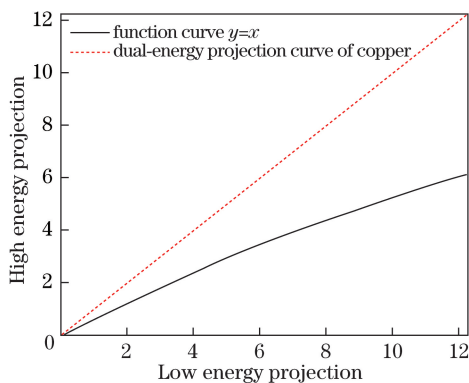


图 10 金属铜的真双能投影曲线

Fig. 10 True dual-energy projection curves of copper

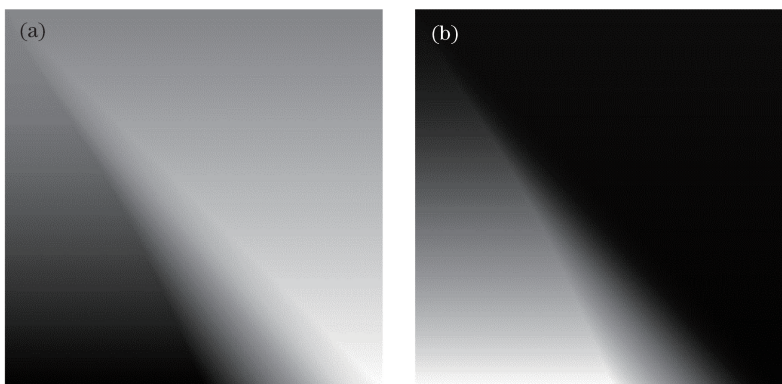


图 11 优化标定范围后的真双能 CT 系统投影查找表图像。(a)碳;(b)铝

Fig. 11 Projection lookup table images of true dual-energy CT system after calibration scope optimization.

(a) Carbon; (b) aluminum

4.2 伪双能系统标定

对于 3.2 节所述的伪双能 CT 系统, 如果不采用标定范围优化算法, 就得不到 $P_{\text{inf}} \in [0, P_{\text{inf}}^{\text{max}}]$, $P_{\text{sup}} \in [0, P_{\text{sup}}^{\text{max}}]$, $P_{\text{inf}}^{\text{max}} = P_{\text{sup}}^{\text{max}} = 10$ 范围内的投影查找表, 而依据如图 12 所示的铜的伪双能投影曲线, 经过双能投影标定范围优化后, 可得到标定范围内完整的收敛结果, 标定所得投影查找表如图 13 所示。图 13 中碳投影查找表图像的灰度显示窗口为 $[-137, 34]$, 铝投影查找表图像的灰度显示窗口为 $[-1.8, 96]$ 。

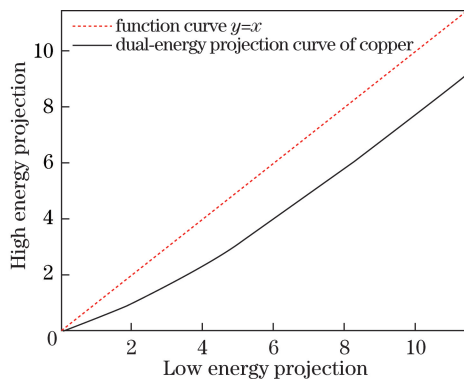


图 12 金属铜的伪双能投影曲线

Fig. 12 Pseudo dual-energy projection curve of copper

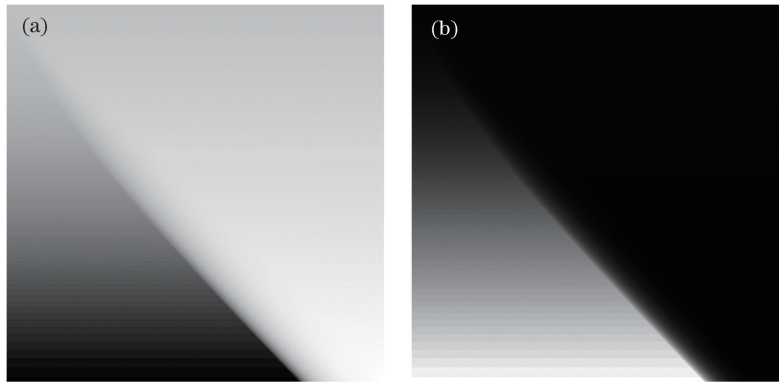


图 13 优化标定范围后的伪双能 CT 系统投影查找表图像。(a)碳;(b)铝

Fig. 13 Projection lookup table images of pseudo dual-energy CT system after calibration scope optimization.

(a) Carbon; (b) aluminum

5 结 论

针对双能预处理重建提出了一种优化迭代算法,该算法针对采用 Levenberg-Marquardt 算法求解投影积分方程组对双能 CT 系统进行标定,有效改善了方程组迭代的收敛性,提高了系统标定的计算速度。算法主要通过优化初值选择和优化投影标定数据范围 2 种手段进行优化,对双能 CT 成像的实际工程应用具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Fessler J A, Elbakri I, Sukovic P, *et al.* Maximum-likelihood dual-energy tomographic image reconstruction[C]. SPIE, 2002, 4684: 38-49.
- [2] Sukovic P, Clinthorne N H. Penalized weighted least-squares image reconstruction for dual energy X-ray transmission tomography[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2000, 19(11): 1075-1081.
- [3] Yan C H, Whalen R T, Beaupré G S, *et al.* Reconstruction algorithm for polychromatic CT imaging: application to beam hardening correction[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2000, 19(11): 1-11.
- [4] Eger L, Do S, Karl W C, *et al.* Implementation of an image-based dual-energy method for explosives detection on real CT data[Z/OL]. [2017-04-10]. <http://www.censsis.neu.edu/RICC/2009/posters/final/ALERTp10.pdf>.
- [5] Liu X, Primak A N, Yu L F, *et al.* Quantitative imaging of chemical composition using dual-energy, dual-source CT[C]. SPIE, 2008, 6913: 69134Z.
- [6] Liu X, Yu L F, Primak A N, *et al.* Quantitative imaging of element composition and mass fraction using dual-energy CT: three-material decomposition[J]. Medical Physics, 2009, 36(5): 1602-1609.
- [7] Alvarez R E, Macovski A. Energy-selective reconstructions in X-ray computerized tomography[J]. Physic in Medicine & Biology, 1976, 21(5): 733-744.
- [8] Chuang K S, Huang H K. Comparison of four dual energy image decomposition methods[J]. Physic in Medicine & Biology, 1988, 33(4): 455-466.
- [9] Chuang K S. Theory and applications of dual energy technique[D]. Los Angeles: University of California, 1986.
- [10] Chuang K S, Huang H K. A fast dual-energy computational method using isotransmission lines and table lookup[J]. Medical Physics, 1987, 14(2): 186-192.
- [11] Cardinal H N, Fenster A. An accurate method for direct dual-energy calibration and decomposition[J]. Medical Physics, 1990, 17(3): 327-341.
- [12] Cardinal H N, Fenster A. Analytic approximation of the log-signal and log-variance functions of X-ray imaging systems, with application to dual-energy imaging[J]. Medical Physics, 1991, 18(5): 867-879.
- [13] Tang S J, Mou X Q, Luo T. An iteration algorithm in dual-energy X-ray imaging based on polychromatic physics model[C]. SPIE, 2006, 6142: 61422R.
- [14] Zou Y, Sliver M D. Analysis of fast kV-switching in dual-energy CT using a pre-reconstruction decomposition technique[C]. SPIE, 2008, 6913: 691313.
- [15] Coleman A J, Sinclair M. A beam hardening correction using dual-energy computed tomography[J]. Physic in Medicine &

- Biology, 1985, 30(11): 2253-2265.
- [16] Baer M, Maaß C, Kachelrieß M. Image-based dual energy CT using optimized precorrection functions: a practical new approach of material decomposition in image domain[J]. Medical Physics, 2009, 36(8): 3818-3829.
- [17] Ying Z R, Naidu R, Crawford C R. Dual energy computed tomography for explosive detection[J]. Journal of X-Ray Science and Technology, 2006, 14(4): 235-256.
- [18] Ying Z R, Naidu R, Guilbert K, *et al.* Dual energy volumetric X-ray tomographic sensor for luggage screening[C]. IEEE Sensors Applications Symposium, 2007: 1-6.
- [19] Zhang G W, Cheng J P, Zhang L, *et al.* A practical reconstruction method for dual energy computed tomography[J]. Journal of X-Ray Science and Technology, 2008, 16(2): 67-88.
- [20] Naidu R, Bechwati I, Crawford C R. Decomposition of multi-energy scan projections using multi-step fitting: US7197172[P]. 2007-03-27.
- [21] Li Baolei, Zhang Yaojun. Projection decomposition algorithm of X-ray dual-energy computed tomography based on projection matching[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0311002.
李保磊, 张耀军. 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[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0311002.
- [22] Li Lei, Wang Linyuan, Cai Ailong, *et al.* Projection decomposition algorithm for X-ray dual-energy computed tomography based on isotransmission line fitting[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0834001.
李磊, 王林元, 蔡爱龙, 等. 基于等值线拟合的 X 射线双能 CT 快速投影分解算法[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0834001.