

# 基于计算层析成像扫描数据的 X 射线能谱估计方法

张慧滔 张 朋

(首都师范大学检测成像实验室, 北京 100048)

**摘要** X 射线能谱分布在双能谱 X 射线计算层析(CT)成像、CT 图像的硬化校正、CT 成像的定量分析等方面起着重要的作用。传统的 X 射线能谱估计方法是通过直接测量 X 射线穿过不同厚度物质后的衰减数据,间接估计 X 射线的能谱分布。与传统方法相比,提出一种由已知结构模体的 CT 数据间接估计 X 射线能谱的方法。该方法的特点是:1)不需要精确测量射线穿过物质的长度,只需要对已知结构和材质的模体进行 CT 扫描便可获得该材质下的衰减曲线,并且该方法对模体的制作精度要求不高;2)采用了带非线性约束的迭代求解方法,由于在迭代求解过程中加入了 X 射线能谱模型作为约束条件,大大减轻了求解模型的病态性和不稳定性。所采用的 X 射线能谱模型考虑了靶材料对射线的吸收,更加接近实际 CT 系统的 X 射线能谱分布。数值实验表明:与已有方法相比,该方法能够更精确、更稳定地估计出 X 射线能谱的韧致辐射分布和特征辐射分布。

**关键词** X 射线光学;成像系统;能谱估计;能谱模型;计算层析成像扫描数据;交替迭代算法;重建算法

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1134001

## X-Ray Spectrum Estimation Method from Scanning Data of Computed Tomography Phantoms

Zhang Huitao Zhang Peng

(Computer Tomography Laboratory, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract** X-ray spectrum plays an important role in dual spectral X-ray computed tomography (CT) imaging, CT beam hardening correction, quantitative CT analysis and so on. The conventional methods estimate the spectrum from a set of transmission data measured directly for different thicknesses of step-wedge phantoms. A novel estimation method of X-ray spectrum is proposed. The proposed method has two features. First, the dependence of the transmission intensity on the thickness of attenuation materials from the CT data of simple phantoms is restored. This not only simplifies the phantom production and the measurement process, but also can restore a more accurate dependence of the transmission intensity on the thickness of materials. Second, an alternative iteration algorithm for the spectrum estimation based on the parameter spectrum model is developed, in which the effect of the anode material is considered. The algorithm can relieve ill-posedness and instability for solving the spectrum estimation problem, by using the parameter X-ray spectrum model as constraint condition. The results of numerical experiments with several simulation data suggest that the proposed method is capable to reconstruct X-ray spectra more accurately and robustly for both bremsstrahlung and characteristic photons, compared with some transmission measurement methods.

**Key words** X-ray optics; imaging systems; spectrum estimation; spectrum model; computed tomography scanning data; alternative iteration algorithm; reconstruction algorithm

**OCIS codes** 340.7740; 110.6960; 110.7740

## 1 引 言

计算层析(CT)成像系统的 X 射线能谱分布在双能谱 CT 成像、CT 图像的硬化校正、CT 图像的

散射校正、CT 图像的定量分析等众多领域扮演着重要的角色。由于 CT 系统中 X 光机产生的 X 射线的流强较大,利用 X 射线光谱仪直接测量比较困

**收稿日期**: 2013-05-02; **收到修改稿日期**: 2013-06-18

**基金项目**: 国家自然科学基金(61127003,61201427)、北京市自然科学基金(3112006)

**作者简介**: 张慧滔(1980—),男,博士,讲师,主要从事 CT 成像理论与应用方面的研究。E-mail: zhanght@mail.cnu.edu.cn  
本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

难,因此人们提出了多种间接的方法来估计 CT 系统的 X 射线能谱分布。

间接估计 X 射线能谱的一类方法是利用 X 射线穿过不同厚度物质的衰减数据将谱估计问题归结成一病态线性方程组的求解问题。如何克服或减轻该问题的病态性和不定性是解决该问题的关键。文献[1]中采用了正则化和降维的办法减轻模型矩阵的病态性和不定性。文献[2]根据谱自身的物理特性构造了合适的正则化项。然而这两种方法都不能较好地估计 X 射线谱分布中的特征辐射分布,并且估计的韧致辐射分布也与真实的韧致辐射分布相差较远。文献[3-4]采用了最大期望算法(EM)来克服模型矩阵的病态性,该方法可以较好地估计出 X 射线能谱分布。然而 EM 迭代方法对迭代的初值要求较高,当初始值较差或者初始值中不含有特征峰信息时该方法无法正确估计出 X 射线的能谱分布。间接估计 X 射线能谱的另一类方法是建立 X 射线能谱的分布模型,利用 X 射线穿过不同厚度物质的衰减数据间接估计模型中的参数。文献[5]提出了一种基于 X 射线能谱模型的非线性估计方法,该方法需要求解非线性模型中的参数,求解稳定性较差,需要加入较多的约束信息。另外该方法提出的 X 射线谱分布模型没有考虑靶材料对射线的滤波衰减,所估计的 X 射线能谱分布在靶材料吸收边附近的误差较大。

现有的估计 CT 系统 X 射线能谱分布的方法均需要直接测量 X 射线穿过不同厚度物质(也称衰减器)的衰减数据。医用 CT 中通常采用等效水、铝制作衰减器;而工业 CT 中通常采用铝、铜制作衰减器。直接测量衰减数据的方法容易产生测量误差,加重谱估计模型中的病态性。射线通过衰减器的长度不但与衰减器的厚度有关,还与衰减器、X 光机焦斑、探测器各探元之间的相对位置有关。因此射线通过衰减器的长度很难精确测量,尤其是在估计显微 CT 系统的 X 射线能谱分布时。另外,为了工程应用的方便,一般只利用较少(最多几十个)厚度的衰减器进行实验。每个厚度下的衰减数据对应谱估计模型的方程组中的一个方程。方程个数显著小于变量个数时必然导致方程组求解的不定性。

本文提出一种由 CT 数据间接估计 CT 系统 X 射线能谱分布的方法。该方法有两个特点:1)该方法不需要精确测量射线穿过物质的长度,只需要对已知结构和材质的模体进行 CT 扫描,便可获得射线穿过物质的长度与衰减数据之间的函数对应关

系,即衰减曲线。该方法对模体的制作精度要求不高,采用由单材质制作的断面为矩形的模体即可。材质的选取与衰减器的选取类似,医用 CT 选择等效水或铝,工业 CT 选择铝或铜。2)该方法采用了带非线性约束的迭代求解方法,由于在迭代求解过程中加入 X 射线能谱模型作为约束条件,大大减轻了求解模型的不定性和病态性。另外所提出的 X 射线能谱模型在文献[5]的基础上考虑了靶材料对射线的吸收,更加接近实际的 CT 系统的 X 射线能谱分布。数值实验表明,与传统的 X 射线能谱估计方法相比,所提出的谱估计方法可以更精确、稳健地估计出 CT 系统的 X 射线能谱分布,包括 X 射线能谱的韧致辐射分布和特征辐射分布。

## 2 谱估计模型

多色 X 射线穿过物质后的强度可由下式表示:

$$I(L) = \int S(E) \exp\left[-\int_L \mu(x, E) dl\right] dE, \quad (1)$$

式中  $L$  表示一条 X 射线路径,  $\mu(x, E)$  表示被测物体在点  $x$  处关于能量为  $E$  的光子的线性衰减系数;  $S(E)$  表示归一化的等效能谱,即  $\int S(E) dE = 1$ , 该能谱与 X 光机的发射谱、探测器的闪烁体以及所用滤波片的材质和厚度有关。

当被测物质为均匀单材质物质时,上述模型可以表示为

$$I(H) = \int S(E) \exp[-H\mu(E)] dE, \quad (2)$$

式中  $H$  为射线穿过该物质的长度。 $H = 0$  时,  $I_0 = \int S(E) dE = 1$ 。离散后模型表示为

$$I(H) = \sum_{i=1}^N S(E_i) \exp[-H\mu(E_i)] \Delta E_i, \quad (3)$$

其中  $N$  为 X 射线能谱的离散点个数,即为待求解的未知数个数。通过采集不同厚度  $H$  下的  $I(H)$  可以增加求解方程的个数,提供更多的信息求解未知数  $S(E_i)$ ,  $i = 1, \dots, N$ 。

## 3 谱估计方法

提出了一种利用已知结构模体的 CT 数据间接估计 CT 系统的能谱分布的方法。设  $\mu(E)$  为模体材质的线性衰减系数;  $f(x)$  为模体的材质分布;  $\mathcal{P}_{u, \beta} f$  为函数  $f(x)$  的扇束 CT 投影变换,  $u$  为探测器坐标,  $\beta$  为旋转角度。扇束 CT 扫描时探测器采集的 CT 数据为

$$I(u, \beta) = \int S(E) \exp[-\mu(E) \mathcal{R}_{u, \beta} f(x)] dE, \quad (4)$$

$S(E)$  为 CT 系统的 X 射线能谱分布。

X 光机的射线能谱模型由靶面产生的韧致辐射、特征辐射及系统的固有滤波对射线的衰减等部分构成<sup>[6]</sup>。可以描述为

$$S(E, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{d}) = [\Phi(E, \mathbf{b}) + \Psi(E, \mathbf{c})] \Theta(E, \mathbf{d}), \quad (5)$$

其中  $\Phi(E, \mathbf{b})$  为韧致辐射，可以用三阶多项式来描述：

$$\Phi(E, \mathbf{b}) = b_0 + b_1 E + b_2 E^2 + b_3 E^3, \quad (6)$$

其中  $\mathbf{b} = (b_0, b_1, b_2, b_3)$ ； $\Psi(E, \mathbf{c})$  为特征辐射，可以用  $\delta$  函数来描述：

$$\Psi(E, \mathbf{c}) = \sum_{i=1}^m [c_i \delta(E - E_i)], \quad (7)$$

其中  $\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_m)$ ， $m$  是特征峰的个数，与靶材料有关，对于常用的钨靶 X 光机来说，它有 4 条特征谱线，分别是  $E_i = 57.198, 59.132, 67.120, 69.110$  keV。 $\Theta(E, \mathbf{d})$  为系统的固有滤波对射线的衰减，包括两部分，一部分是 X 射线产生后靶材料对射线的衰减，衰减系数与靶材料有关；另一部分是 X 射线在穿过球管窗口和探测器晶体时的衰减，这类物质的衰减系数可近似为与 X 射线能量的三次方成反比<sup>[7]</sup>。 $\Theta(E, \mathbf{d})$  定义为

$$\Theta(E, \mathbf{d}) = \exp[-d_1 E^{-3} - d_2 \mu_w(E)], \quad (8)$$

其中  $\mathbf{d} = (d_1, d_2)$ ； $\mu_w(E)$  为靶材料的线性衰减系数。文献<sup>[5]</sup>中无  $d_2 \mu_w(E)$  项。

估计 X 射线能谱的过程可分为两部分：首先利用单材质模体的 CT 数据估计材质厚度与透射 X 射线强度的对应关系  $H(I)$  (衰减曲线)；然后利用 X 光机射线的能谱模型作为约束，构造交替迭代算法。

### 3.1 $H(I)$ 的估计方法

谱的估计方法需要探测 X 射线穿过不同厚度的衰减器后的射线强度，并需要已知它们之间的对应关系。 $H(I)$  可以用多项式近似表示为<sup>[8]</sup>

$$H(I) \approx a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3 + a_4 p^4, \quad (9)$$

其中  $p = -\ln(I/I_0)$ 。估计衰减曲线的过程即是求解多项式的系数  $a_i, i = 0, \dots, 4$ 。

对单材质的被测物体进行扇束 CT 扫描。旋转角度为  $\beta$  时，坐标为  $u$  的探测器单元采集的数据记作  $I_{u, \beta}$ ，因此

$$p_{u, \beta} = -\ln(I_{u, \beta}/I_0), \quad (10)$$

此时对应的被测物质的厚度记作  $H_{u, \beta}$ ， $H_{u, \beta} = \mathcal{R}_{u, \beta} f$ 。根据(3)式，有

$$\mathcal{R}_{u, \beta} f \approx a_0 + a_1 p_{u, \beta} + a_2 p_{u, \beta}^2 + a_3 p_{u, \beta}^3 + a_4 p_{u, \beta}^4. \quad (11)$$

对(11)式左右进行扇束滤波反投影重建，

$$f \approx \sum_{i=0}^4 a_i f_i(\mathbf{x}), \quad (12)$$

其中  $f_i(\mathbf{x})$  为由  $[p(u, \beta)]^i$  经扇束滤波反投影算子  $\mathcal{R}^{-1}$  重建的图像。 $a_i$  的求解可以转化成如下的最优化求解问题：

$$(a_{i=0, \dots, 4}) = \operatorname{argmin} \int \left[ f(x) - \sum_{i=0}^4 a_i f_i(x) \right]^2 dx. \quad (13)$$

### 3.2 基于 X 光机谱模型的优化迭代算法

X 射线能量谱估计的离散模型将能谱估计问题转化成求解线性方程：

$$\mathbf{A} \mathbf{s} = \mathbf{I} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (14)$$

其中  $\mathbf{s} = [S(E_1), S(E_2), \dots, S(E_N)]$  为 CT 系统的 X 射线能谱的离散分布； $\mathbf{I} = (I_1, I_2, \dots, I_M)$  为射线穿过不同厚度后的衰减数据； $\boldsymbol{\varepsilon}$  为测量误差。利用(3)式，可以获得相应的射线穿过的物质厚度  $H = (H_1, H_2, \dots, H_M)$ 。 $\mathbf{A}$  为  $M \times N$  阶矩阵，

$$A_{i,j} = \exp[-H_j \mu(E_i)] \Delta E_i, \quad (15)$$

$i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, M$ 。

由于 CT 系统的 X 射线能谱可以描述成(5)式，因此待估计的  $\mathbf{s}$  同时满足(13)式和(5)式。能谱  $\mathbf{s}$  的估计可以通过交替求解如下两个最优化问题来获得

$$\mathbf{s} = \operatorname{argmin}(\|\mathbf{A} \mathbf{s} - \mathbf{I}\|^2), \quad (16)$$

$$(\mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{d}) = \operatorname{argmin}[\|\mathbf{s} - S(\mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{d})\|^2], \quad (17)$$

其中  $\mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{d}$  与(5)式中定义相同。

求解步骤可以归纳成如下几步：

1) 选择一个初值  $\mathbf{s}_0$ ；

2) 设  $\mathbf{s}_n$  是迭代  $n$  次后的结果，利用联合代数重建算法(SART)迭代公式<sup>[9]</sup>求解方程组  $\mathbf{A}' \mathbf{A} \mathbf{s} = \mathbf{A}' \mathbf{I}$  获得  $\bar{\mathbf{s}}_n$  [(15)式优化问题的解，即为方程组  $\mathbf{A}' \mathbf{A} \mathbf{s} = \mathbf{A}' \mathbf{I}$  的解]；

3) 令(16)式中的  $\mathbf{s} = \mathbf{s}_n$ ，利用 Levenberg-Marquardt 非线性优化方法<sup>[10]</sup>求最优解  $(\mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{d})$ ，离散化(5)式获得  $\mathbf{s}_n(\mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{d})$ ；

4) 计算  $\mathbf{s}_{n+1} = \mathbf{s}_n + \alpha[\mathbf{s}_n(\mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{d}) - \bar{\mathbf{s}}_n]$ ， $\alpha$  为松弛因子， $\alpha \in (0, 1)$ ；

5) 返回步骤 2) 直到  $\|\mathbf{A} \mathbf{s} - \mathbf{I}\|^2 < \varepsilon$  或  $n < N_{\max}$ ， $\varepsilon$  为提前设置的某一阈值， $N_{\max}$  为最大迭代次数。

## 4 数值实验

利用数值实验验证算法的正确性和稳定性。利用仿真谱对算法进行验证,即将仿真软件获得的 X 射线能谱分布作为待恢复的 X 射线能谱,并数值仿真生成 CT 扫描数据,然后根据提出的谱估计方法估计 X 射线的能谱分布,利用均方根距离度量估计谱与真实谱的逼近程度。数值实验采用的 X 射线能谱由开源软件 Spectrum GUI 生成。实验模体材质的衰减系数从美国国家标准技术研究院(NIST)网站获得。

为进一步验证所提出的方法的可行性,利用了实验室的工业 CT 设备进行实验。实际 CT 系统无法获得真实的 X 射线能谱分布,无法将估计谱与真实的 X 射线能谱进行比较;为此利用估计的实际

CT 系统的 X 射线能谱分布对 CT 图像进行硬化校正,以此来证明谱估计算法的可靠性。

### 4.1 扫描数据的数值模拟

利用开源软件 Spectrum GUI 仿真得到 X 射线的能谱分布,采样间隔为 1 keV。Spectrum GUI 软件可以模拟多个 X 光机球管下的能谱分布,包括 GE Maxiray 125 球管,Dunlee PX1557 球管等。对 X 射线的能谱分布进行了归一化,即  $\int S(E)dE = 1$ 。图 1 中分别是 X 光机球管 GE Maxiray 125,Dunlee PX1557,在管电压峰值为 80 kVp,140 kVp 时的分布情况;黑色曲线为原始谱离散点所连接的曲线;红色曲线为提出的谱分布模型非线性拟合得到的曲线;蓝色曲

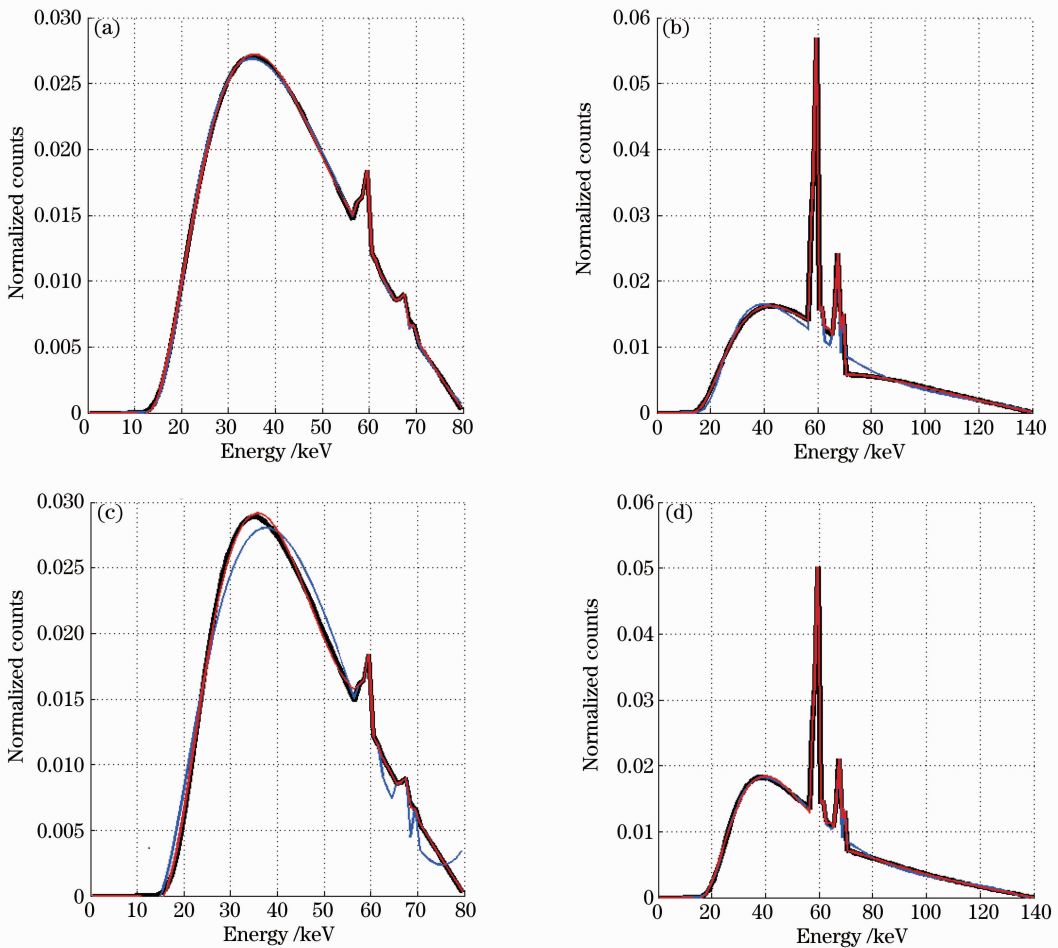


图 1 开源软件 Spectrum GUI 生成的原始谱分布和利用谱模型拟合的谱分布,黑色是原始谱分布。(a) GE Maxiray 125 球管 80 kVp 下的能谱分布;(b) GE Maxiray 125 球管 140 kVp 下的能谱分布;(c) Dunlee PX1557 球管 80 kVp 下的能谱分布;(d) Dunlee PX1557 球管 140 kVp 下的能谱分布

Fig. 1 Comparisons of the spectra of different X-ray tubes with the spectra fitted by two parameter spectrum models. Black curves in (a) and (b) are the spectra of the X-ray tube of the Dunlee PX1557 at 80 kVp and 140 kVp respectively, and those in (c) and (d) are the spectra of the X-ray tube of GE Maxiray 125 at 80 kVp and 140 kVp respectively

线为文献[5]提出的谱分布模型非线性拟合得到的曲线。从图 1 可以看出提出的谱模型的拟合曲线更接近 Spectrum GUI 仿真的能谱分布。数值实验中采用的模体为楔形铝模体,扫描断面为矩形。实验所选矩形的边长与 X 光机的管电压有关。管电压为 140 kVp 时,选择的矩形边长为 3 cm 和 1 cm,如图 2(a)所示。

根据(4)式数值模拟获得衰减数据  $I(u, \beta)$ ,扫描角度为 720 个,每个角度下的采样为 1370 个,射线源到探测器的距离为 50 cm,射线源到旋转中心的距离为 40 cm,出射光子数为  $10^6$  个。在衰减数据上加入泊松噪声,模拟带有泊松噪声的衰减数据  $I_{\text{noise}}(u, \beta)$ 。

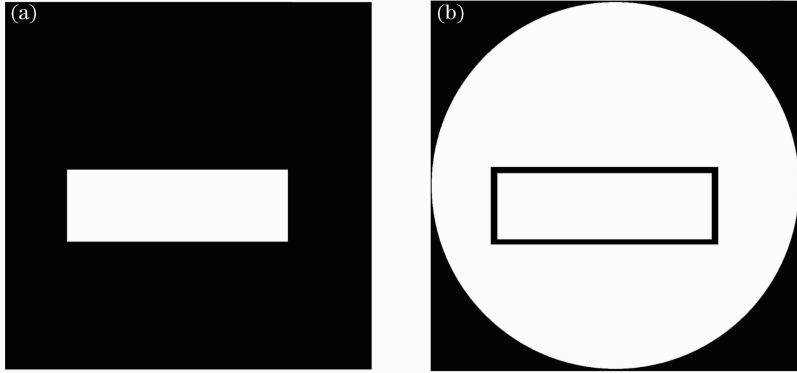


图 2 (a)模体和(b)权函数图像

Fig. 2 (a) Model and (b) weight function images

#### 4.2 估计衰减曲线的数值实验

根据提出的估计方法,利用扫描的 CT 数据估计衰减曲线。对投影数据  $p(u, \beta) = -\ln[I(u, \beta)]$  的  $n$  次幂进行滤波反投影重建,  $n = 0, \dots, 4$ ; 重建得到 5 幅基图像  $f_0(\mathbf{x}), f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), f_3(\mathbf{x}), f_4(\mathbf{x})$ , 如图 3 所示。在求解优化问题(12)时,加入权函数  $w(\mathbf{x})$  [如图 2(b) 所示], 黑色区域的值为 0, 白色区

域的值为 1, 优化问题(12)可以表示为

$$(a_{i=0, \dots, 4}) = \operatorname{argmin} \left\{ \int w(\mathbf{x}) \left[ f(\mathbf{x}) - \sum_{i=0}^4 a_i f_i(\mathbf{x}) \right]^2 d\mathbf{x} \right\}. \quad (18)$$

求解该优化问题, 确定  $a_{i=0, \dots, 4}$ 。衰减曲线见图 4 中的红色曲线, 图 4 中“\*”为 X 射线通过不同厚度的铝板衰减后的实际衰减值; 图 4(a)为无噪声数据估

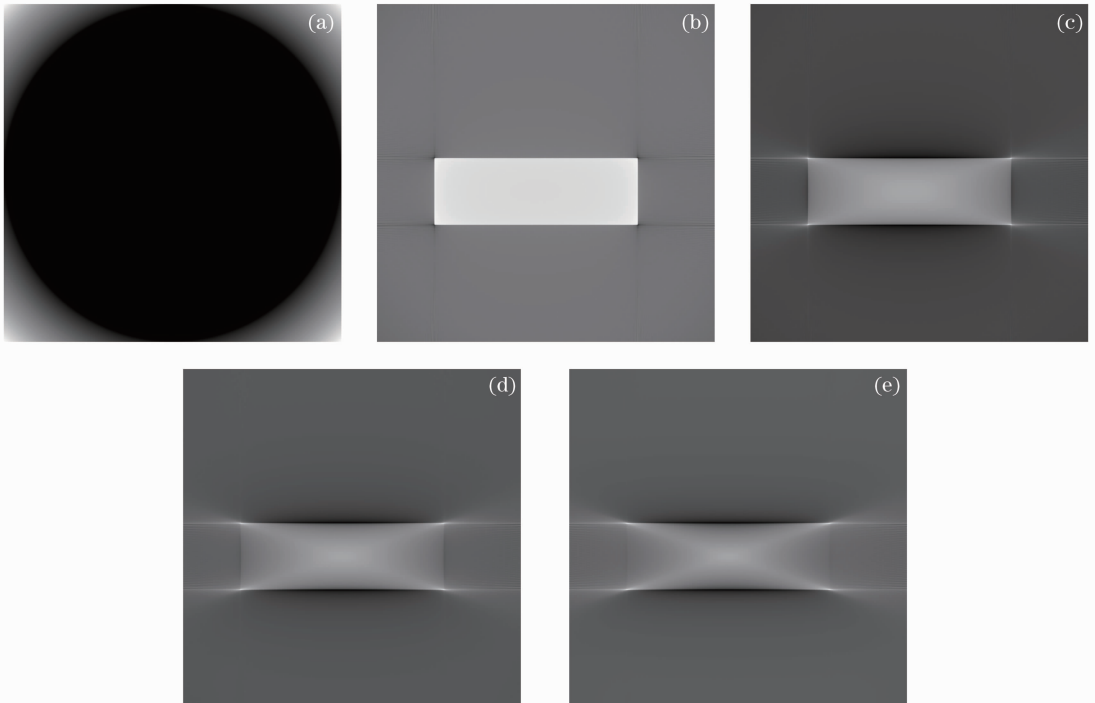


图 3 基图像  $f_n(\mathbf{x})$ 。(a),(b),(c),(d),(e) 分别对应  $n = 0, \dots, 4$  时的图像

Fig. 3 Basis images  $f_n(\mathbf{x})$ . (a),(b),(c),(d),(e) corresponding to images with  $n = 0, \dots, 4$ , respectively

计的衰减曲线,图 4(b)为带有泊松噪声数据估计的衰减曲线。可以看出本方法获取的衰减曲线与实际衰减数据吻合得很好。实验中发现模体的设计也至

关重要,设计的模体应尽可能在不同方向覆盖较多的厚度,这样估计的衰减曲线才更准确。

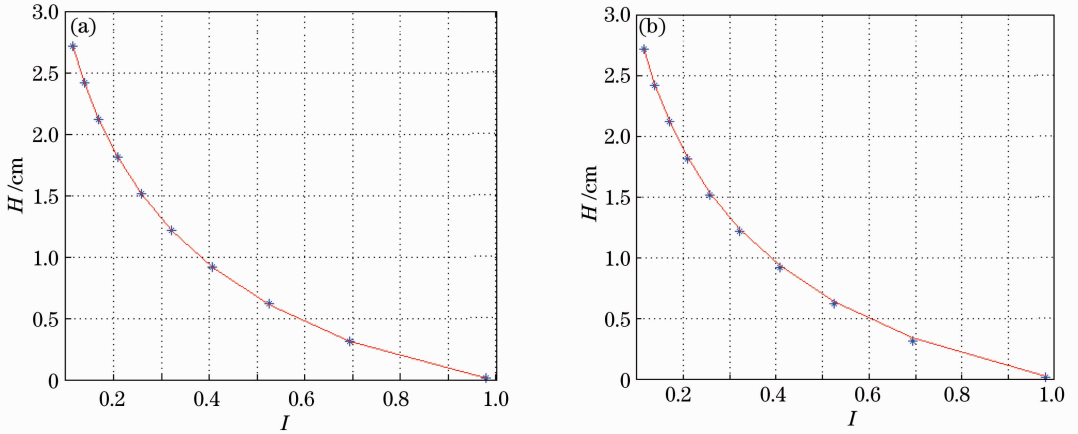


图 4 估计的衰减曲线与衰减数据的比较,‘\*’表示不同厚度下测量的衰减数据,曲线为估计的衰减曲线。

(a)没有噪声数据估计的衰减曲线;(b)带有泊松噪声的数据估计的衰减曲线

Fig. 4 Comparisons of transmission measurements (‘\*’) and transmission curve reconstructed (red curves).

(a) Reconstructed by data without noise; (b) reconstructed by data with Poisson noise

### 4.3 X 射线能谱分布模型的估计方法验证

采用 Dunlee PX1557 X 射线光管产生的 140 kVp 下的 X 射线能谱作为真实 X 射线谱分布;采用加入泊松噪声的投影数据作为实际获得的投影数据,由 4.2 节的方法获得铝材质的衰减曲线。用 EM 算法和所提出的基于模型约束的交替迭代算法对 X 射线谱进行估计。基于模型约束的交替迭代算法对初始谱没有限制,利用该算法对任意的初始谱均能收敛到真实谱。EM 算法需要初始谱中带有特征谱分布信息,当初始谱选择不合适时,EM 算法不收敛,EM 算法的初始谱选择为管电压 100 kVp 时的谱分布。为了比较估计谱与真实谱的接近程度,利用均方根误差(RMSE)来刻画,即

$$V_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N [S(E_i) - s(E_i)]^2}{\sum_{i=0}^N [S(E_i) - 1/N]^2}}, \quad (19)$$

其中  $s$  为估计谱, $S$  为真实谱。图 5 中显示了 EM 算法和所提出算法的迭代次数与均方根误差的关系。EM 算法迭代 200 多次后估计谱与真实谱的距离趋于稳定,基于模型约束的交替迭代算法迭代 400 次后估计谱与真实谱的距离趋于稳定。从图 5 可以发现尽管基于模型约束的交替迭代算法需要 400 多次迭代才可趋向稳定,但是该算法估计的谱比 EM 算法估计的谱更逼近真实谱。图 6 为 EM 算法和基于模型约束的交替迭代算法迭代 400 次后的

估计谱;其中黑色曲线是原始谱,红色曲线是估计谱。从图 5 和图 6 可以看出基于模型约束的交替迭代算法可以稳定、精确地估计出 X 光机的谱分布。

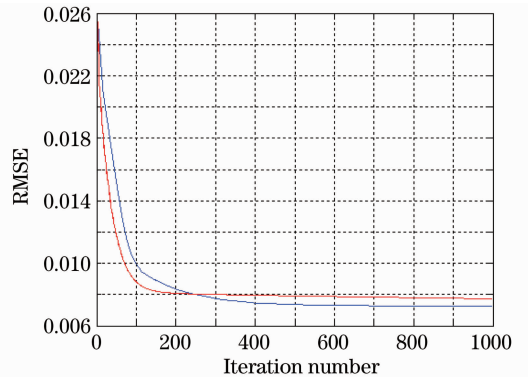


图 5 均方根误差随迭代次数的变化曲线,蓝色为所提算法的收敛曲线,红色为 EM 算法的收敛曲线

Fig. 5 RMSE of estimated CT spectra by proposed method (red curves) and EM method (blue curves) as a function of iteration number

### 4.4 单材质物质的硬化校正实验

对于单材质的物体,可以利用获取的衰减曲线进行硬化校正。利用 4.2 节估计的铝材质衰减曲线系数  $a_{i=0,\dots,4}$ ,对单材质的铝质模体的 CT 图像进行硬化校正:

$$f_{\text{correct}} = \mathcal{R}^{-1} \sum_{i=0}^4 a_i (p_{u,\beta})^i, \quad (20)$$



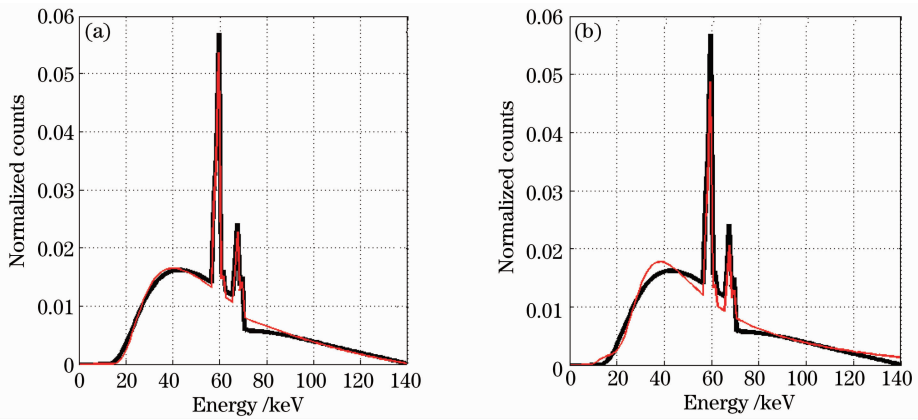


图 6 估计谱与真实谱的比较。(a)所提出的算法迭代 400 次的估计谱分布；(b) EM 算法迭代 400 次的估计谱分布  
 Fig.6 Comparisons of original spectra (black curves) with the spectra estimated (red curves). (a) Spectra estimated by our method after 400 iterations; (b) spectra estimated by the EM method after 400 iterations

其中  $f_{\text{correct}}$  表示硬化校正后的图像。图 7 为利用该方法对带有泊松噪声的数据进行硬化校正的结果。图 7(a)为校正前的 CT 图像,图 7(b)为校正后的 CT 图像,图 7(c)为 CT 图像第 512 行的高度图,其中黑色为图像模型曲线,红色为校正后的曲线,蓝色

为校正前的曲线。可以明显看到,校正后 CT 图像的杯状伪影得到了明显改善。当被测物体不是铝材质物质时还需要通过估计 CT 系统的能谱分布进行硬化校正。

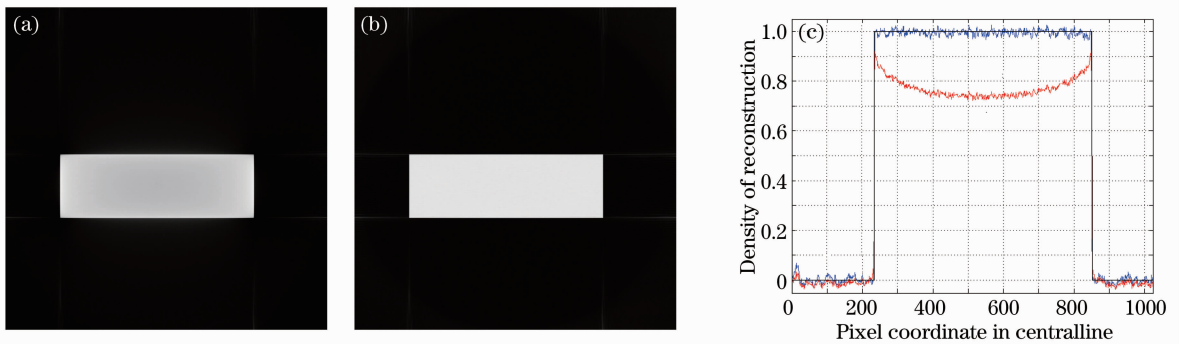


图 7 硬化校正前后重建 CT 图像的效果比较。(a)校正前的图像；(b)校正后的图像；(c)中心行的高度图比较  
 Fig.7 Results with and without beam-hardening correction. (a) CT image without beam-hardening correction; (b) CT image with beam-hardening correction; (c) the profile in central line of the CT image

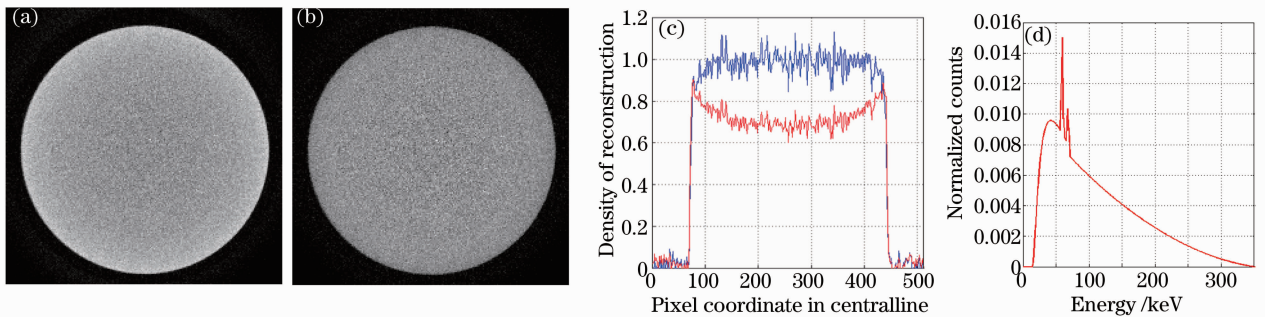


图 8 实际 CT 系统管电压 350 kVp 时的实验结果。(a)硬化校正前的 CT 图像；(b)硬化校正后的 CT 图像；(c)硬化校正前后 CT 图像中心行的高度图；(d)利用所提出的方法估计实际 CT 系统的 X 射线能谱分布结果

Fig.8 Result of lab CT experiments at 350 kVp. (a) CT image without beam-hardening correction; (b) CT image with beam-hardening correction; (c) profile in centralline of the image (a) and (b); (d) spectra estimated by our method

#### 4.5 实际 CT 数据的重建结果

为了验证所提出方法的可行性,利用实验室的 CT 系统进行实验。该 CT 系统的 X 光机型号为 YXLON, TU 450-D05,探测器为截距为 0.083 mm 的线阵列 NTB 探测器。实验时的管电压为 350 kVp。实验模体选用直径为 7 cm 的铝柱,图 8 为实际 CT 系统的实验结果。从图 8(d)可以看出估计谱的特征谱线与靶材料的特征谱线相同。为了验证恢复谱的正确性,利用恢复的 X 射线谱分布对实际 CT 数据进行硬化校正,图 8(a)是硬化校正前的 CT 图像,图 8(b)是利用所提出的方法硬化校正后的 CT 图像,可以看出 CT 图像杯状伪影得到明显改善。

## 5 结 论

提出了一种基于 CT 扫描数据的能谱估计方法,该方法利用多项式拟合的思想由 CT 扫描数据估计物质的衰减曲线,然后将改进的 X 射线能谱模型作为约束条件,构造了一种交替迭代的谱估计算法。从实验结果可以看出,所提出的方法不仅能够准确估计 X 射线谱的韧致辐射分布,还能较好地估计特征辐射分布。

### 参 考 文 献

1 C H Yan, R T Whalen, G S Beaupre, *et al.*. Modeling of polychromatic attenuation using computed tomography

reconstructed images [J]. *Medical Physics*, 1999, 26(4): 631-642.

2 Zou Jing, Wang Jianguang, Wang Wenbin, *et al.*. Indirect measurement of X-ray spectrum [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(4): 503-508.

邹 晶,王建光,王文彬,等. X 射线能量谱间接测量方法[J]. *光学技术*, 2008, 34(4): 503-508.

3 E Y Sidky, L Yu, X Pan, *et al.*. A robust method of X-ray source spectrum estimation from transmission measurements: demonstrated on computer simulated, scatter-free transmission data [J]. *J Appl Phys*, 2005, 97(12): 124701.

4 X H Duan, J Wang, L F Yu, *et al.*. CT scanner X-ray spectrum estimation from transmission measurements [J]. *Medical Physics*, 2011, 38(2): 993-997.

5 Yang Ying, Mou Xuanqin, Yu Houjun, *et al.*. Mode-based tungsten anode X-ray tube spectra reconstruction method [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(10): 2285-2291.

杨 莹,牟轩沁,余厚军,等. 基于模型的钨靶 X 射线球管光谱重建[J]. *电子学报*, 2010, 38(10): 2285-2291.

6 C Ruth, P M Joseph. Estimation of a photon energy spectrum for a computed tomography scanner [J]. *Medical Physics*, 1997, 24(5): 695-702.

7 J Als-Nielsen, Des McMorro. *Elements of Modern X-Ray Physics* [M]. Chichester: Wiley, 2001. 17-23.

8 M Kachelrie, K Sourbelle, W A Kalender. Empirical cupping correction: a first-order raw data pre-correction for cone-beam computed tomography [J]. *Medical Physics*, 2006, 33(5): 1269-1275.

9 A H Andersen, A C Kak. Simultaneous algebraic reconstruction technique (SART): a superior implementation of the art algorithm [J]. *Ultrasonic Imaging*, 1984, 6(1): 81-94.

10 Yuan Yaxiang, Sun Wenyu. *Optimization Theory and Method* [M]. Beijing: Science Press, 2006. 382-398.

袁亚湘,孙文瑜. 最优化理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 382-398.

栏目编辑: 韩 峰