

基于减影融合的 X 射线多谱计算机层析成像方法

孟红娟, 陈平*, 潘晋孝, 李毅红

中北大学理学院, 信息探测与处理山西省重点实验室, 山西 太原 030051

摘要 在分析不同能谱对应的公共能量段下多能投影之间关系的基础上, 研究了基于减影融合的多谱 CT 成像算法。该方法在分析不同射线源参数下射线能谱之间关联性的基础上, 建立了递变能量多能投影序列减影融合模型, 并通过递变能量获取工件的多个多能投影序列, 结合减影融合模型, 对所得投影图像进行减影融合, 去除公共能量段投影信息, 获取近似窄能谱的投影信息。最后采用统计迭代算法进行图像重建, 减小噪声干扰, 提高重建质量。实验结果表明, 所提方法能通过多谱投影减影融合得到近似窄谱投影, 有效抑制射束硬化伪影。

关键词 光谱学; X 射线成像; 多谱 CT 成像; 减影融合; 窄谱投影; 硬化校正

中图分类号 O434.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.083001

X-Ray Multi-Spectral CT Imaging Method Based on Subtraction Fusion

Meng Hongjuan, Chen Ping*, Pan Jinxiao, Li Yihong

*Shanxi Key Laboratory of Signal Capturing & Processing, School of Science,
North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China*

Abstract Based on the analysis of the relationship between the photon intensity received by the detector under the common energy segment corresponding to different energy spectra, a multi-spectral computed tomography (CT) imaging method using subtraction fusion is proposed herein. From the analysis of the correlation across the X-ray spectrum using different X-ray source parameters, we establish a subtraction fusion model involving various energy polychromatic projection sequences and obtain multiple sequences of the phantom by varying energy. Combined with the subtraction fusion model, the projection is obtained at different energies, the projection information of the common energy segments is removed using subtraction fusion, and the projection information of the approximate narrow spectrum is derived. Finally, the expectation-maximization/total-variation algorithm is used to reconstruct the image, reduce the noise interference, and improve the reconstruction quality. Theoretical analysis and experiments show that the proposed method can obtain approximate narrow-spectrum projection through multi-spectral projection subtraction fusion, which can effectively suppress beam hardening artifacts and improve CT imaging quality.

Key words spectroscopy; X-ray imaging; multi-spectral CT imaging; subtraction fusion; narrow-spectrum projection; beam hardening correction

OCIS codes 300.6560; 340.7440

1 引言

X 射线计算机层析(CT)成像技术以其无损、高分辨率等优点, 已被广泛应用于许多领域, 特别是在工业检测中^[1]。而现有 CT 成像系统的 X 射线束能谱是连续的宽谱, 常用的 CT 重建算法都是基于单能假设, 导致重建图中出现硬化伪影, 影响重建图像

的质量。

针对投影多谱性与单能假设重建不一致的问题, 人们将能谱信息引入到成像过程中^[2-4], 主要的成像方法有双能 CT 成像、能谱滤波分离多谱 CT 成像、同步辐射 CT 成像, 以及光子计数型 CT 成像等。双能 CT 成像过程中, 无论是使用双源^[5]、双层探测器^[6], 还是使用双扫描^[7]、快速切换电压^[8]等成像方式, 可

收稿日期: 2019-11-26; 修回日期: 2019-12-13; 录用日期: 2019-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(61801437, 61871351, 61971381)、山西省自然科学基金(201801D221206, 201801D221207)

* E-mail: pc0912@163.com

利用的能谱信息有限,多能伪影不能得到有效抑制。为了获得更好的重建质量,人们将更多的能谱引入到CT重建过程中。Long等^[9]和黄甜甜等^[10]在EM(expectation maximization)算法的基础上引入能量信息,实现多谱CT成像,抑制了重建图中硬化伪影的影响。但是该类算法一般需要已知能谱信息或者材质信息,而且算法模型复杂,计算复杂度高。特别在实际CT成像中,一般无法已知能谱信息或者工件的材质信息,导致该类算法很难应用于实际生产中。

目前,还有一类实现多谱CT成像的方法是直接通过CT系统获取窄谱投影数据,主要包括光子计数型探测器成像方法^[11]和同步辐射CT成像方法^[12]。光子计数型探测器具有能谱分离的能力,能够预先设置能谱范围,得到不同谱段的投影信息,满足单能重建的假设,但受限于成像时间、成像分辨率、高噪声等问题,很难广泛应用于工程实际中。为提高重建图像质量,陈佩君等^[13]从图像域入手,在一定程度上提高了成像质量。同步辐射CT也能实现单能CT成像,但是其为大科学装置,共享面较宽,无法满足实验室检测成像需求。借助光子计数探测器能谱分离的成像思想,牛素莹等^[14]提出一种基于能谱滤波分离的多谱CT成像方法,通过添加滤波片获取窄谱投影,虽然实现了窄谱成像,但滤波片一般较薄,无法得到较窄谱段的投影,因此只能在一定程度上减少硬化现象,并不能完全抑制射线硬化的影响。赵耀霞等^[15]提出一种基于基效应分解的投影序列盲源分离算法,可有效消除硬化影的影响,但是该方法对初值依赖性强,在实际应用中初值调整较为复杂。

为了弥补现有研究方法的不足,本文通过分析多谱成像原理,发现不同谱段公共能量段下的射线强度具有一定的相关性;研究了基于减影融合的多谱CT

成像方法,利用减影融合方法对探测器接收到的射线强度信息进行融合,消除公共能量段投影信息,获得窄谱段投影,并利用统计迭代算法重建图像,实现近似窄谱的单能CT成像,达到抑制射束硬化的目的。

2 减影融合多谱CT成像

2.1 X射线多谱成像原理

在实际CT成像系统中,假设给定管电压、管电流以及曝光时间,对应的X射线能谱为 $S(E)$ 。透照材质的均匀物体,在坐标 x 处光子能量为 E 时衰减系数为 $\mu(x, E)$,射线穿过物体的厚度为 d ,经过衰减后探测器接收到的射线强度为 I ,由于采集得到的投影数据都是离散的,根据Beer定律,射线强度可表示为

$$I = \sum_{E=0}^{E_{\max}} S(E) \exp[-\mu(x, E)d] \Delta E, \quad (1)$$

式中: ΔE 为能量间隔。在两个不同能量段 $0 \sim E_1$ 和 $0 \sim E_2$ (其中 $E_2 > E_1$)下透照同一个物体,当管电压、管电流以及曝光时间设定后,对应的X射线能谱分别为 $S_1(E)$ 、 $S_2(E)$,在坐标 x 处光子能量为 E 时物体衰减系数为 $\mu(x, E)$,且射线穿过物体的厚度为 d ,探测器接收到的射线强度分别为 I_1 和 I_2 ,其中 I_1 可以表示为

$$I_1 = \sum_{E=0}^{E_1} S_1(E) \exp[-\mu(x, E)d] \Delta E = \sum_{E=0}^{E_1} f(E), \quad (2)$$

式中: $f(E)$ 表示光子能量 $E \in [0, E_1]$ 时衰减后的射线强度。

$$f(E) = S_1(E) \exp[-\mu(x, E)d] \Delta E, E \in [0, E_1]. \quad (3)$$

I_2 可以表示为

$$\begin{aligned} I_2 &= \sum_{E=0}^{E_2} S_2(E) \exp[-\mu(x, E)d] \Delta E = \\ &= \sum_{E=0}^{E_1} S_2(E) \exp[-\mu(x, E)d] \Delta E + \sum_{E=E_1}^{E_2} S_2(E) \exp[-\mu(x, E)d] \Delta E = \\ &= \sum_{E=0}^{E_1} \frac{S_2(E)}{S_1(E)} S_1(E) \exp[-\mu(x, E)d] \Delta E + \sum_{E=E_1}^{E_2} S_2(E) \exp[-\mu(x, E)d] \Delta E = \sum_{E=0}^{E_1} g(E) + \sum_{E=E_1}^{E_2} h(E), \quad (4) \end{aligned}$$

式中: $g(E)$ 、 $h(E)$ 分别表示光子能量 $E \in [0, E_1]$ 和 $E \in [E_1, E_2]$ 时衰减后的射线强度。

$$g(E) = \frac{S_2(E)}{S_1(E)} S_1(E) \exp[-\mu(x, E)d] \Delta E = \frac{S_2(E)}{S_1(E)} f(E), \forall E \in [0, E_1], \quad (5)$$

$$h(E) = S_2(E) \exp[-\mu(x, E)d] \Delta E, \forall E \in [E_1, E_2]. \quad (6)$$

由(5)式可知,当每个能量下的能谱分布已知时,系数 $\frac{S_2(E)}{S_1(E)}$ 为常数, $g(E)$ 可由 $f(E)$ 线性表示,也就是在公共能量区间 $[0, E_1]$ 中,射线强度 I_1, I_2 存在线性关系,选择合适的融合系数, I_2 可以近似减掉公共能量区间 $[0, E_1]$ 中的强度信息,

$$\begin{aligned}
 I &= I_n - a_{n-1}I_{n-1} - a_{n-2}I_{n-2} - \cdots - a_1I_1 = \\
 &\sum_{E=0}^{E_n} S_n(E) \exp[-\mu(x, E)d] \Delta E - \sum_{E=0}^{E_{n-1}} a_{n-1} S_{n-1}(E) \exp[-\mu(x, E)d] \Delta E - \cdots - \\
 &\quad \sum_{E=0}^{E_1} a_1 S_1(E) \exp[-\mu(x, E)d] \Delta E = \\
 &\quad \sum_{E=0}^{E_1} [S_n(E) - a_{n-1}S_{n-1}(E) - \cdots - a_1S_1(E)] \exp[-\mu(x, E)d] \Delta E + \\
 &\sum_{E=E_1}^{E_n} S_n(E) \exp[-\mu(x, E)d] \Delta E - \sum_{E=E_1}^{E_{n-1}} a_{n-1} S_{n-1}(E) \exp[-\mu(x, E)d] \Delta E - \cdots - \\
 &\quad \sum_{E=E_1}^{E_2} a_2 S_2(E) \exp[-\mu(x, E)d] \Delta E = \\
 &\quad \underbrace{\sum_{E=0}^{E_1} [S_n(E) - \sum_{j=1}^{n-1} a_j S_j(E)] \exp[-\mu(x, E)d] \Delta E}_1 + \\
 &\quad \underbrace{\sum_{E=E_1}^{E_n} S_n(E) \exp[-\mu(x, E)d] \Delta E - \sum_{j=2}^{n-1} \sum_{E=E_1}^{E_j} a_j S_j(E) \exp[-\mu(x, E)d] \Delta E}_2, \tag{7}
 \end{aligned}$$

式中: $a_j (j=1, 2, \dots, n-1)$ 为减影权重系数。在(7)式中,等号右边第1项为公共能量段 $[0, E_1]$ 范围内, n 个不同能谱下投影序列的线性组合,第2项为窄能量段 $[E_1, E_n]$ 范围的投影序列的线性组合。当各个能谱分布已知时,选择合适的减影权重系数 a_j ,在能量段 $[0, E_1]$ 范围内,将前 $n-1$ 个能谱下的投影信息与第 n 个能谱下的投影信息进行融合。

留下近似窄能量段 $[E_1, E_2]$ 内的投影信息,将宽谱变为窄谱。

2.2 基于能谱信息减影融合模型

公共能量段射线强度之间具有线性关系,可以类推到具有公共能量段的 n 个投影序列对应的减影融合模型,对应的数学表达式为

当减影权重系数 a_j 满足

$$S_n(E) - \sum_{j=1}^{n-1} a_j S_j(E) = 0, \tag{8}$$

可以消除公共能量段 $[0, E_1]$ 的投影信息,只保留窄能量段 $[E_1, E_n]$ 的投影序列,将工件在窄能量段 $[E_1, E_n]$ 下的衰减系数近似为常数 μ ,可以巧妙解决多色投影和单能假设的问题,对应的投影序列可以写为

$$\begin{aligned}
 I &= \sum_{E=E_1}^{E_n} S_n(E) \exp[-\mu(x, E)d] \Delta E - \sum_{j=2}^{n-1} \sum_{E=E_1}^{E_j} a_j S_j(E) \exp[-\mu(x, E)d] \Delta E \approx \\
 &[\sum_{E=E_1}^{E_n} S_n(E) \Delta E - \sum_{j=2}^{n-1} \sum_{E=E_1}^{E_j} a_j S_j(E) \Delta E] \exp[-\mu(x)d] = I_0 \exp[-\mu(x)d]. \tag{9}
 \end{aligned}$$

当且仅当 $\mu(x)=0$ 时, $I=I_0$,本文的 I_0 取减影融合后投影背景处的平均值。

本文从 SpectrumGUI 中获得能谱数据^[16],结合最小二乘拟合方法求得减影权重系数,对应的最

小二乘模型为

$$a_j^* = \arg \min_{a_j} \| S_n(E) - \sum_{j=1}^{n-1} a_j S_j(E) \|_2^2. \tag{10}$$

3 实验设计及结果讨论

3.1 实验样品

为了验证减影融合成像方法的可行性和有效

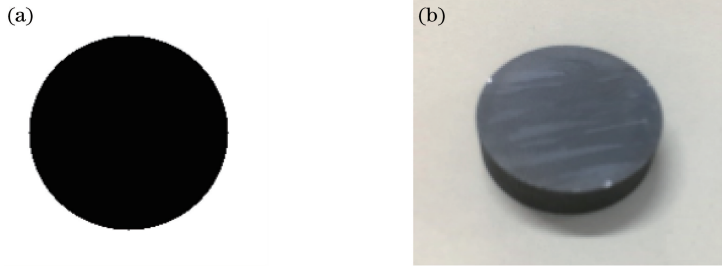


图 1 实验模型图。(a)仿真硅模型横切面;(b)圆柱体硅模型

Fig. 1 Diagrams of experimental models. (a) Slice of the silicon used in the simulation; (b) model of silicon cylinder

3.2 能谱的选择

图 2 所示为硅、铝、镁 3 种常见元素的线性衰减系数随能量的变化关系,可以看出,衰减系数随能量的增加而减小,并且当能量大于 50 keV 时衰减系数逐渐趋于平稳。根据衰减系数随能量变化这一特性,本研究主要通过减影融合方式将宽谱变为窄谱,窄谱范围内近似单能,以解决多色投影与单能重建算法不匹配问题。

下面主要讨论实验所需能谱数量。实验所需的能谱由开源能谱软件 SpectrumGUI 仿真得到(网址为 <http://spectrumgui.sourceforge.net/>)。分别设计了 2 个能谱减影、3 个能谱减影、4 个能谱减影等实验。图 3(a)为 50 kV、60 kV 电压对应能谱减影后的能谱图;图 3(b)为 50 kV、60 kV、70 kV 电压对应能谱减影后的能谱图;图 3(c)为 50 kV、60 kV、70 kV、80 kV 电压对应能谱减影后的能谱图。从图 3(a)可以看出,只有两个能谱时,公共能

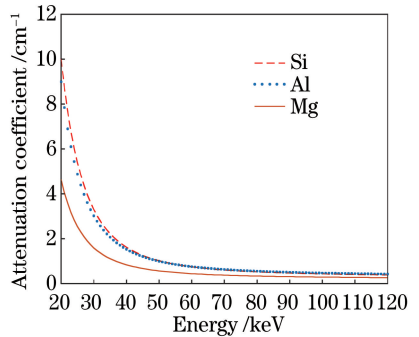


图 2 线性衰减系数曲线

Fig. 2 Cures of linear attenuation coefficient

量段的能谱信息还有残留;从图 3(b)和图 3(c)可以看出,能谱数 ≥ 3 时,公共能量段的能谱信息基本接近于 0,仅保留了窄谱信息。在减影的过程中,能谱数量太少,公共能量段能谱信息会有残余,但能谱数量太多会导致实验复杂度增大,鉴于实验成本和实验复杂度的考虑,本文选用 3 个能谱进行实验。

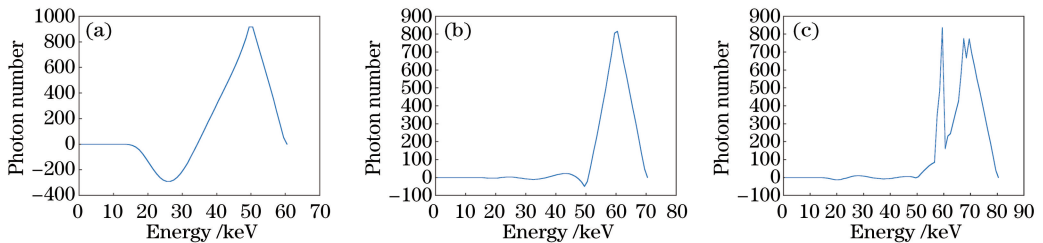


图 3 能谱减影融合结果。(a) 2 个能谱减影;(b) 3 个能谱减影;(c) 4 个能谱减影

Fig. 3 Subtraction fusion results of spectra. (a) Subtraction fusion result of two spectra; (b) subtraction fusion result of three spectra; (c) subtraction fusion result of four spectra

3.3 仿真实验

3.3.1 实验参数和实验条件

射线源与转台中心之间的距离为 390.2 mm,转台中心与探测器的距离为 390.2 mm。对应的探测

性,本文通过仿真和实验来验证。设计了圆柱体硅材质模型进行仿真,直径为 20 mm,其横切面的模型如图 1(a)所示。实验中同样采用圆柱体硅实物模型,如图 1(b)所示。

器由 520 个探元组成,探元尺寸为 1 mm。采集投影数据时,工件的初始位置、电流、曝光时间均相同。电压分别为 60 kV、70 kV 和 90 kV,电流均为 70 μ A,曝光时间均为 333 ms。工件旋转一周,每隔

1°采集一张投影图像。

3.3.2 实验结果及分析

对 60 kV、70 kV 和 90 kV 3 个电压采集未滤波投影图像分别进行重建,结果如图 4(a)~(c)所示,

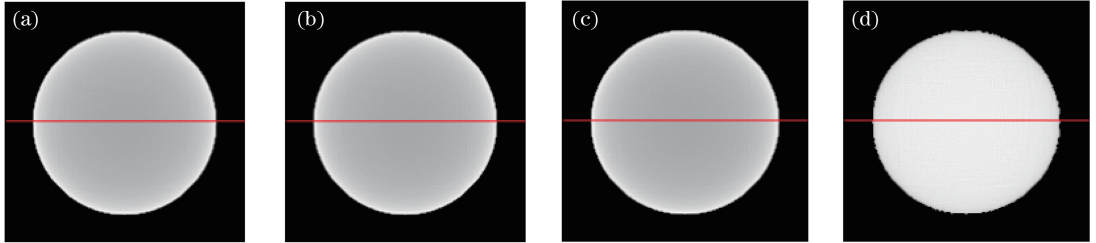


图 4 减影融合投影前、后 CT 重建图像的仿真结果。(a) 60 kV 电压时投影重建图像;(b) 70 kV 电压时投影重建图像;(c) 90 kV 电压时投影重建图像;(d) 本文方法的减影融合投影重建图像

Fig. 4 Simulation results of reconstruction images before and after subtraction fusion projection. (a) Image reconstructed with 60 kV polychromatic projection; (b) image reconstructed with 70 kV polychromatic projection; (c) image reconstructed with 90 kV polychromatic projection; (d) image reconstructed with the proposed subtraction fusion projection

取图 4 中直线所在行的灰度进行比较,结果如图 5 所示。可以看出,直接重建图像的杯状硬化伪影严重,减影融合后的投影重建图像灰度均匀,表明本文方法可以抑制射线硬化造成的杯状伪影。

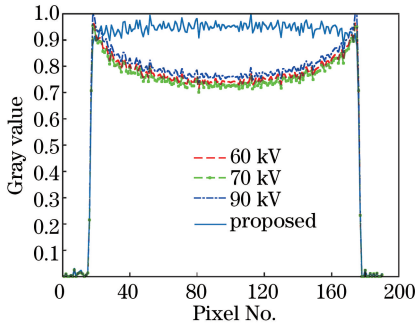


图 5 图 4 重建图中直线处的灰度曲线

Fig. 5 Curves of gray value of CT reconstruction images at the straight line in Fig. 4

3.4 单材质实际数据实验

3.4.1 实验参数和实验条件

对图 1(b)所示的实际工件,采用 YXLON FF20 CT 实验平台采集实验投影数据。在实验中,由于减影融合后光子强度变小,结合成像理论,通过改变电压来改变射线能谱的同时,通过改变电流和曝光时间来增加光子强度,增加减影融合投影的有效信息量。电压、电流、曝光时间参数列于表 1,除探元尺寸改为 0.127 mm 外,其余参数与仿真相同。

3.4.2 实验结果及分析

图 6(a)~(c)所示分别为 3 个电压对应的投影直接重建结果,重建图像出现中间暗、边缘亮的现

可以看出直接重建的图像边缘出现亮圈,中间相对较暗,存在硬化伪影。图 4(d)所示为采用本文方法得到的窄谱投影重建的图像,可以看出,图像的亮度分布均匀,没有受到硬化伪影的影响。

表 1 电压、电流、曝光时间对应扫描参数

Table 1 Scanning parameters of voltage, current, and exposure time

Sequence of projection	Sequence 1	Sequence 2	Sequence 3
Voltage /kV	60	70	90
Current / μ A	100	90	70
Exposure time /ms	909	714	526

象,硬化伪影明显。对 3 个电压下的投影进行减影融合处理,重建结果如图 6(d)所示,可以看出,图像灰度分布均匀。

取图 6 中直线位置的灰度进行比较,结果如图 7 所示。可以看出,直接重建图像的杯状伪影严重,本文方法能较好地抑制射线硬化的影响,进一步验证了本文方法能将宽谱变成窄谱,能巧妙解决多谱投影和单能算法不一致所导致的射束硬化问题。

3.5 多材质实际数据实验

为了验证减影融合成像方法的适用性,对镁、铝双材质碎块通过投影扫描后进行图像重建,实验参数与单材质实验一致,重建结果如图 8 所示,其中图 8(a)~(c)所示为直接重建结果,图像出现亮边缘。图 8(d)所示为减影重建结果,相同材质图像灰度值分布均匀。

取图 8 中直线位置的灰度进行比较,结果如图 9 所示。可以看出,减影融合后的图像中相同材质物质的衰减系数更接近同一灰度值,在很大程度上消除了射线硬化造成的灰度不均匀的影响,表明本文方法能够有效消除射线硬化的影响。

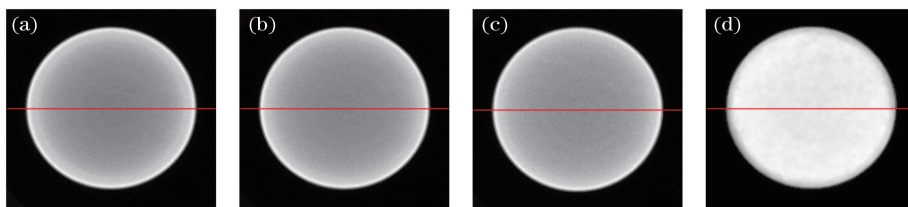


图 6 减影融合投影前、后 CT 重建图像的单材质实验结果。(a) 60 kV 电压时投影重建图像;(b) 70 kV 电压时投影重建图像;(c) 90 kV 电压时投影重建图像;(d) 本文方法的减影融合投影重建图像

Fig. 6 Single material experiment results of reconstruction images before and after subtraction fusion projection. (a) Image reconstructed with 60 kV polychromatic projection; (b) image reconstructed with 70 kV polychromatic projection; (c) image reconstructed with 90 kV polychromatic projection; (d) image reconstructed with the proposed subtraction fusion projection

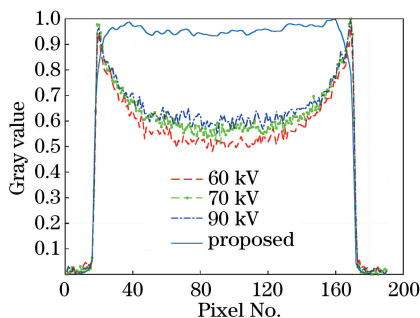


图 7 图 6 重建图中红线处灰度曲线图

Fig. 7 Curves of gray value of reconstruction images at the straight line in Fig. 6

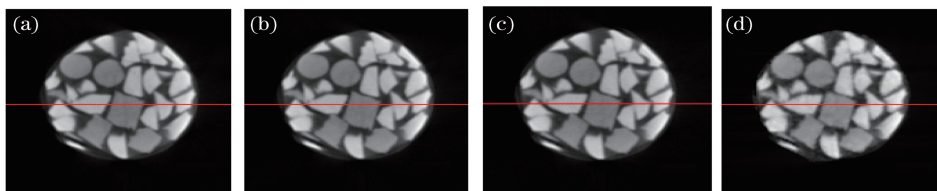


图 8 减影融合投影前、后 CT 重建图像的多材质实验结果。(a) 60 kV 电压时投影重建图像;(b) 70 kV 电压时投影重建图像;(c) 90 kV 电压时投影重建图像;(d) 本文方法的减影融合投影重建图像

Fig. 8 Multi-material experiment results of reconstruction images before and after subtraction fusion projection. (a) Image reconstructed with 60 kV polychromatic projection; (b) image reconstructed with 70 kV polychromatic projection; (c) image reconstructed with 90 kV polychromatic projection; (d) image reconstructed with the proposed subtraction fusion projection

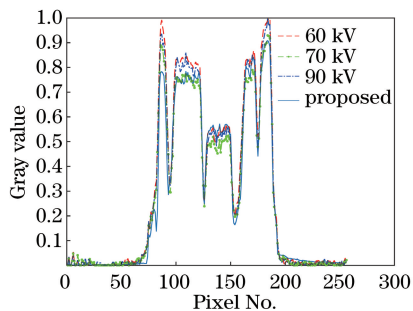


图 9 图 8 重建图像中直线处灰度曲线

Fig. 9 Curves of gray value of CT reconstruction images at the straight line in Fig. 8

4 结 论

针对 X 射线投影的多谱性与单能重建算法不一致问题,本文通过分析工件在不同能谱对应的公共能量段下多能投影,建立减影融合模型,提出一种基于减影融合的多谱 CT 成像方法。该方法能够去除公共能量段的投影信息,将宽谱投影变成窄谱投影。理论分析和实验结果表明,所提出的多谱成像方法能够有效抑制射束硬化,提高 CT 成像质量。另外,由于减影融合成像方法克服了现有多能重建算法和光子计数探测器在实际应用中存在的困难,

因此在未来的实际应用中具有重要的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Izumi S, Kamata S, Satoh K, et al. High energy X-ray computed tomography for industrial applications [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1993, 40(2): 158-161.
- [2] Zhao D, Chen P, Han Y, et al. Multi-spectral CT sequence DCM fusion algorithm based on priori components[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(3): 968-972.
赵丹, 陈平, 韩焱, 等. 基于先验组分的多谱 CT 序列 DCM 融合算法研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(3): 968-972.
- [3] Kramer P, Weckenmann A. Multi-energy image stack fusion in computed tomography [J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(4): 045105.
- [4] Chen P, Han Y, Pan J X. CT imaging method with varying energy based on logarithm demodulation[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(13): 138701.
陈平, 韩焱, 潘晋孝. 基于对数解调的递变能量 CT 成像方法 [J]. 物理学报, 2015, 64(13): 138701.
- [5] Petrongolo M, Zhu L. Noise suppression for dual-energy CT through entropy minimization[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2015, 34(11): 2286-2297.
- [6] Ozguner O, Dhanantwari A, Halliburton S, et al. Objective image characterization of a spectral CT scanner with dual-layer detector [J]. Physics in Medicine & Biology, 2018, 63(2): 025027.
- [7] Barber R F, Sidky E Y, Schmidt T G, et al. An algorithm for constrained one-step inversion of spectral CT data [J]. Physics in Medicine and Biology, 2016, 61(10): 3784-3818.
- [8] Coleman A J, Sinclair M. A beam-hardening correction using dual-energy computed tomography [J]. Physics in Medicine and Biology, 1985, 30(11): 1251-1256.
- [9] Long Y, Fessler J A. Multi-material decomposition using statistical image reconstruction for spectral CT [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2014, 33(8): 1614-1626.
- [10] Huang T T, Chen P, Pan J X, et al. Multi-spectrum CT imaging method based on spectrum matching priors[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(2): 503-508.
黄甜甜, 陈平, 潘晋孝, 等. 基于能谱匹配先验的多谱 CT 成像方法 [J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(2): 503-508.
- [11] Schmidt T G, Barber R F, Sidky E Y. A spectral CT method to directly estimate basis material maps from experimental photon-counting data [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2017, 36(9): 1808-1819.
- [12] Hao J, Zhang L, Xing Y X, et al. Dual-energy CT imaging method using synchrotron radiation [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2011, 51(4): 457-461.
郝佳, 张丽, 邢宇翔, 等. 基于同步辐射光源的双能 CT 成像方法 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51(4): 457-461.
- [13] Chen P J, Feng P, Wu W W, et al. Material discrimination by multi-spectral CT based on image total variation and tensor dictionary[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1111002.
陈佩君, 冯鹏, 伍伟文, 等. 基于图像总变分和张量字典的多能谱 CT 材料识别研究 [J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1111002.
- [14] Niu S Y, Pan J X, Chen P. 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.
- [15] Zhao Y X, Han Y, Chen P. Blind separation of multi-voltage projection sequence based on fundamental effect decomposition [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(9): 2763-2768.
赵耀霞, 韩焱, 陈平. 基于基效应分解的多谱投影序列盲分离算法研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(9): 2763-2768.
- [16] Li M F, Zhao Y S, Zhang P. Accurate iterative FBP reconstruction method for material decomposition of dual energy CT [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2019, 38(3): 802-812.