

## 一种三源摆动螺旋安检 CT 成像方法研究

皮真真<sup>1</sup>, 余海军<sup>2,3</sup>, 李雷<sup>1</sup>, 田忠建<sup>1</sup>, 刘丰林<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044;<sup>2</sup>重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;<sup>3</sup>重庆大学工业 CT 无损检测教育部工程研究中心, 重庆 400044

**摘要** 计算机断层成像(CT)技术是安全检查领域重要的技术手段之一,研究新型安检 CT 成像方法具有重要的意义。提出一种可用于旅客行李、快递邮包安全检查的三源摆动螺旋 CT(Triple-Source Swinging Spiral CT, TS-SCT)成像方法,呈圆周均布的三组射线源-探测器围绕旋转中心在  $120^\circ$  范围内往复摆动,检测物体在扫描视场内沿轴向移动,从而实现摆动螺旋扫描。相对于螺旋 CT,该方法不需要整周旋转,选用比滑环耐磨损且易于制造、维护的转动部件,采用线缆传输数据和电力,避免滑环对传输能力的限制。建立了 TS-SCT 成像模型,分析了扫描方式、扫描参数及螺距  $h$  与锥束靠近射线源端在视场  $z$  方向的投影高度的比值  $r$  对成像效率和成像结果的影响,初步设计了一种 TS-SCT 结构,推导了用于 TS-SCT 的 FDK 算法。仿真实验和模拟实验结果表明,TS-SCT FDK 算法正确有效,TS-SCT 方法能实现检测对象的三维成像,在保证成像质量的前提下建议  $r \leq 1/2$ 。

**关键词** 成像系统; 计算机断层成像; 螺旋 CT; 摆动螺旋; 安全检查; 图像重建

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1611003

## Triple-Source Swinging Spiral CT Imaging Method for Security Inspection

Pi Zhenzhen<sup>1</sup>, Yu Haijun<sup>2,3</sup>, Li Lei<sup>1</sup>, Tian Zhongjian<sup>1</sup>, Liu Fenglin<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China;<sup>2</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;<sup>3</sup>Engineering Research Center of Industrial Computed Tomography Nondestructive Testing, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China

**Abstract** Computed tomography (CT) is one of the important technical means in the field of security inspection. It is of great theoretical and practical value to study new CT imaging methods for security inspection. In this paper, a triple-source swinging spiral CT (TS-SCT) imaging method is proposed, which can be used for the safety inspection of passenger luggage and express parcels. Three groups of X-ray source-detector uniformly distributed in the circumference are used to swing around the rotation center in the range of  $120^\circ$ , the detected object moves along the axial direction in the scanning field of view, and the swing spiral scanning is realized. Compared with spiral CT, the proposed method does not need the whole rotation, and can use the rotating parts which are easier to manufacture, maintain, and are more wear-resistant than the slip-ring. Moreover, the cable is used to transmit data and power, breaking the limitation of a slip-ring on data and power transmission capacity. The imaging model of TS-SCT is established, the effects of scanning mode, scanning parameters, and ratio  $r$  between pitch  $h$  and projection height  $T$  of a cone-beam near the source in  $z$ -direction on imaging efficiency and results are analyzed, and the FDK reconstruction algorithm for TS-SCT is derived. The simulated and experimental results show that the TS-SCT

收稿日期: 2021-02-01; 修回日期: 2021-03-02; 录用日期: 2021-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(61471070)、工业 CT 无损检测教育部工程研究中心开放课题

通信作者: \*liufl@cqu.edu.cn

FDK reconstruction algorithm is correct and effective, and the TS-SCT method can be used to realize the 3D imaging of detected objects. On the premise of ensuring imaging quality,  $r \leq 1/2$  is suggested.

**Key words** imaging systems; computed tomography; spiral CT; swinging spiral; security inspection; image reconstruction

**OCIS codes** 110.6960; 340.7440; 110.3010

## 1 引言

随着航空、交通、物流等行业的快速发展,安全检查已被广泛应用于旅客、旅客行李、快递邮包、大型集装箱及车辆等检测。目前,旅客行李、快递邮包行业的安检设备大多采用 X 射线透射成像技术,在一个或多个方向对物体进行透照成像,存在影像重叠、感兴趣对象不易分辨等问题。与 X 射线透射成像不同,计算机断层成像(Computed Tomography, CT)技术是一种可有效检测物体内部结构信息的无损检测方法<sup>[1-3]</sup>,利用 X 射线对物体进行多个角度的投影,再通过相应的图像重建算法,获得物体内部的结构与细节信息。近年来,CT 技术和装备已初步应用于航空旅客行李检查。

国外安检 CT 研究起步较早<sup>[4-5]</sup>。我国从 2004 年开始引入民航安检 CT 设备,2010 年同方威视的安检 CT 系统获得中国民用航空安全检查设备使用许可证。安检 CT 在旅客行李、快递检测行业的应用前景较好,成为研究热点,多能量射线扫描、可分辨危险物品、快速检测等成为其主要研究方向。

CT 成像扫描方式主要分为圆周类和螺旋类。早期的行李安检 CT 设备是基于医疗 CT 设备改造的,为了满足扫描效率要求,采用螺旋 CT(Spiral CT)扫描方式。随着硬件技术的发展,CT 从单排螺旋 CT 发展到多排锥束螺旋 CT,并进一步发展出多源锥束螺旋 CT<sup>[6]</sup>、静态多射线源电子扫描 CT<sup>[7]</sup>。文献[8-9]提出了一种多射线源摆动 CT 扫描成像技术,用于局部缓变过程的成像检测。由于不使用 CT 滑环,该方法具有结构简单、成本低的优点,有重要的应用价值。受多源摆动 CT 技术的启发,本文提出了一种三源摆动螺旋 CT(TS-SCT)方法,三组呈圆周均布的射线源-探测器对在各自  $120^\circ$  范围内往复摆动,同时被测物体沿着旋转中心轴线方向直线运动,从而实现摆动螺旋扫描,最终完成被测物体的轴向连续扫描成像,该方法可用于旅客行李、快递包裹的安全检查。传统安检螺旋 CT 扫描时射线源-探测器长时间运转,对转动零部件的疲劳寿命要求较高。TS-SCT 可以选用比滑环耐磨损且易于制造、维护的转动部件;在往复摆动的结构中,可选用

线缆传输电力和数据,避免滑环对数据和电力传输能力的限制。进一步,TS-SCT 三组射线源-探测器可使用不同能量进行扫描,实现材料的分辨成像,因此,TS-SCT 具有重要的研究价值和应用前景。

螺旋 CT 重建算法主要是围绕解析法展开研究的,解析重建算法分为精确和近似两类。20 世纪 90 年代初,Grangeat 利用三维 Radon 变换和射线变换之间的关系,实现了基于锥束扫描方式的短小物体的三维精确重建<sup>[10]</sup>。随后学者在此基础上进行了不同的改进<sup>[11-13]</sup>。2002 年,Katsevich<sup>[14]</sup>首次提出了基于螺旋扫描轨迹的三维锥束 FBP 精确重建算法。2004 年,Zou 等<sup>[15]</sup>在 Katsevich 算法的基础上进行了改进。2005 年,Yu 等<sup>[16-18]</sup>把 FBP 和 BPF 两类图像重建算法推广到一般的扫描轨迹上,提出了适用于圆周、标准螺旋、变螺距螺旋和变半径螺旋等的精确重建算法。1984 年,Feldkamp 等<sup>[19]</sup>提出了基于圆周扫描轨迹的锥束 FBP 重建算法(FDK 算法),将二维扇束推广到三维锥束,该算法奠定了近似锥束重建算法的理论基础,具有易于实现、计算效率高,锥角较小时重建质量好等优点,适于短物体的重建。为了解决圆周 FDK 在重建长物体时误差较大的问题,1993 年 Wang 等<sup>[20]</sup>将标准 FDK 的圆形扫描轨迹拓展到一般轨迹上,形成了 G-FDK。近年来,多名学者不断对 FDK 进行改进,研究出了多种适用于不同扫描轨迹的 FDK 算法<sup>[21-22]</sup>,其中应用较多的是螺旋 FDK。另一种近似重建算法是基于 PI 线的算法,其是利用 Tam 窗来消除多余数据<sup>[23]</sup>。与精确重建算法相比,近似重建算法较为简单,时间复杂度和空间复杂度也较低,且易于并行计算,适用于商业 CT。在近似重建算法中,FDK 算法具有高效、对噪声鲁棒性好等优点,在小锥角情况下可获得较好的重建效果,在螺旋 CT 三维重建领域中最常用。因此,本文在螺旋 FDK 的基础上研究 TS-SCT FDK 算法。

综上,本文提出了一种可用于旅客行李、快递邮包安全检查的 TS-SCT 方法,建立了 TS-SCT 几何模型,分析了扫描方式和扫描参数,研究了 TS-SCT FDK 算法,并通过仿真实验和模拟实验研究了 TS-SCT 方法的可行性。

## 2 成像方法

### 2.1 成像模型

图 1(a) 所示为 TS-SCT 的扫描轨迹线示意图。其中, 每组射线源和探测器对称布置, 三组射线源和探测器分别具有相同的半径, 围绕同一旋转中心, 呈  $120^\circ$  圆周均布。射线源为点源, 分别用  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  表

示; 探测器可采用平板探测器或弧形阵列探测器, 分别用  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  表示。需要说明的是, 本文使用平板探测器进行研究, 研究结果可推广到弧形阵列探测器。以射线源-探测器旋转中心为坐标原点, 建立笛卡儿直角坐标系  $o-xyz$ 。在扫描过程中, 每对射线源-探测器呈“之”字形运动, 射线源的运动轨迹表示如下。

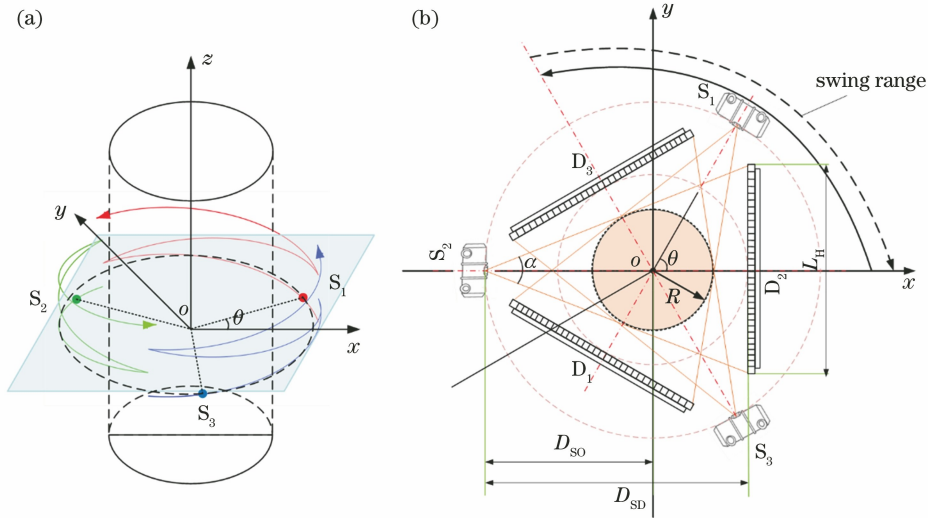


图 1 TS-SCT 示意图。(a) 扫描轨迹线; (b)  $xoy$  平面几何模型

Fig. 1 Schematic of TS-SCT. (a) Scanning trace lines; (b) geometric model in  $xoy$  plane

沿着  $z$  轴负方向看去, 射线源逆时针旋转的运动轨迹为

$$S_i = \left( D_{SO} \cos \left[ \theta + \frac{2\pi}{3} (i-1) \right], D_{SO} \sin \left[ \theta + \frac{2\pi}{3} (i-1) \right], (j-1)h + \frac{3h}{2\pi} \theta \right), \quad (1)$$

射线源顺时针旋转的运动轨迹为

$$S_i = \left( D_{SO} \cos \left[ \theta + \frac{2\pi}{3} (i-1) \right], D_{SO} \sin \left[ \theta + \frac{2\pi}{3} (i-1) \right], jh - \frac{3h}{2\pi} \theta \right), \quad (2)$$

式中: 射线源索引  $i=1, 2, 3$ ; 旋转次数  $j \in \mathbf{Z}^+$ ;  $D_{SO}$  表示射线源焦点到旋转中心的距离;  $h$  表示一对射线源-探测器旋转  $120^\circ$  沿着  $z$  方向前进的距离;  $\theta$  是射线源  $S_1$  和旋转中心  $o$  的连线与  $x$  轴正方向的夹角。当  $j$  为奇数时, 表示射线源逆时针旋转,  $\theta$  从 0 增大到  $2\pi/3$ ; 当  $j$  为偶数时, 表示射线源顺时针旋转,  $\theta$  从  $2\pi/3$  减小到 0。

### 2.2 扫描参数

为了进一步分析 TS-SCT 模型, 取射线源焦点和探测器中心层所在的  $xoy$  平面, 得到 TS-SCT 平面几何模型, 如图 1(b) 所示。TS-SCT 系统的视场 (Field of View, FOV) 是三组射线源在  $xoy$  平面的有效射线重叠的圆形区域, 视场半径  $R$  可表示为

$$R = \frac{D_{SO} \times L_H}{\sqrt{L_H^2 + 4 \times D_{SD}^2}}, \quad (3)$$

式中:  $L_H$  表示探测器水平方向的有效宽度;  $D_{SD}$  表示射线源焦点到探测器中心的距离。

图 2(a) 为单源螺旋 CT 运动轨迹示意图, 其中  $p$  表示螺距, 是指射线源旋转  $360^\circ$  在  $z$  方向前进的距离。在 TS-SCT 结构中, 三个射线源围绕扫描对象旋转  $360^\circ$  时, 每个射线源只需转动  $120^\circ$ , 因此本文将 TS-SCT 中的螺距定义为每个射线源摆动  $120^\circ$  时在  $z$  方向上前进的距离。为了直观展示三源摆动螺旋 CT 的螺距, 将射线源  $S_1$  的运动轨迹展开, 如图 2(b) 所示, 其中  $h$  即为 TS-SCT 的螺距,  $a$  点是“之”字线中点,  $b$  点是“之”字线拐点。

图 3 为锥束螺旋 CT 在  $z$  方向上的几何模型, 其中  $T$  为锥束射线在视场靠近射线源端  $z$  方向的覆盖范围。由图 3 中几何的关系可知

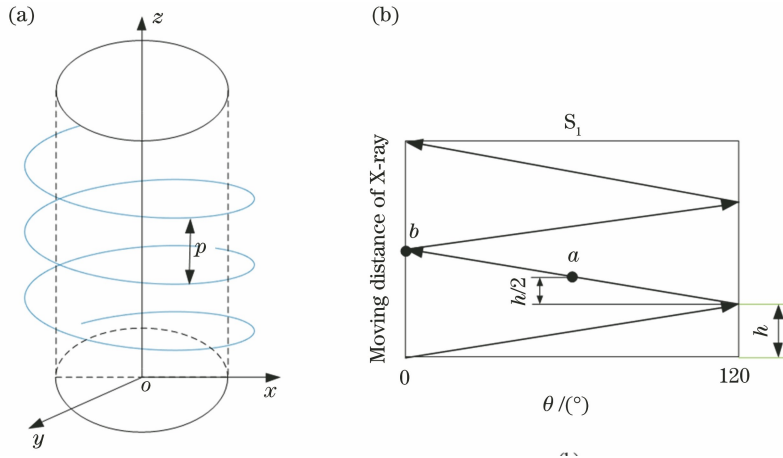


图 2 不同 CT 结构中的射线源运动轨迹示意图。(a) 单源螺旋 CT 运动轨迹示意图;  
(b) TS-SCT 中单个射线源运动轨迹的展开图

Fig. 2 Motion trajectories of X-ray source in different CT structures. (a) Motion trajectory of single-source spiral CT;  
(b) expanded view of moving track of single X-ray source in TS-SCT

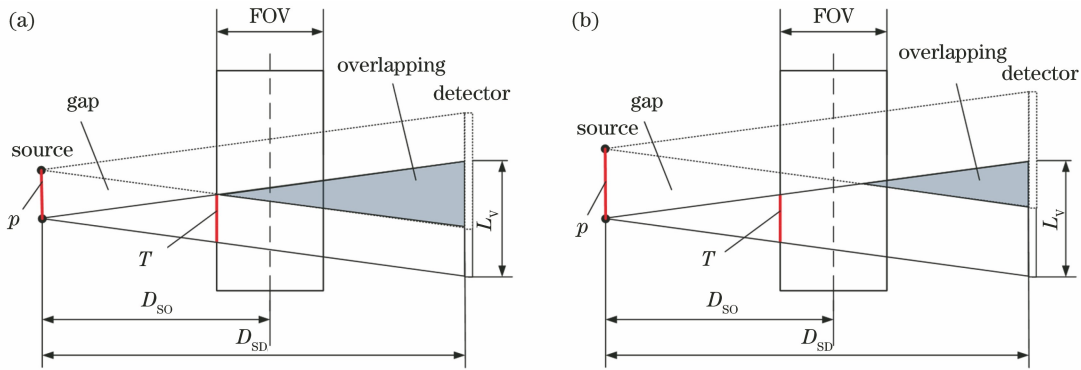


图 3 锥束螺旋 CT 在 z 方向上的几何模型。(a)  $p = T$ ; (b)  $p > T$

Fig. 3 Geometric model of cone-beam spiral CT in z-direction. (a)  $p = T$ ; (b)  $p > T$

$$T = L_V \frac{D_{SO} - R}{D_{SD}}, \quad (4)$$

式中:  $L_V$  表示探测器垂直方向的有效高度。

在螺旋 CT 中,  $z$  方向的投影数据是均匀的; 在 TS-SCT 中, 由于“之”字形扫描轨迹的特殊性, 随着旋转角度的变化,  $z$  方向的投影数据是不均匀的, 拐点处的数据比较密集, 中间相对均匀, 相邻两个拐点之间的数据比较稀疏。对于螺旋 CT, 在  $p = T$  的条件下, 如图 3(a) 所示, 射线源旋转一周时上下两锥束射线正好相交于视场的边缘, 此时视场轴线方向内的点都能被整周射线扫描到; 在  $p > T$  的条件下, 如图 3(b) 所示, 射线源旋转一周后, 上下射线在视场轴线方向形成了一个间隙, 有限角度的射线才能扫描到间隙部分。对于 TS-SCT, 当  $h = T/2$  时, 相邻两个拐点处的视场边缘的点即  $z$  方向上最稀疏的点能被整周扫描到, 视场内其他点会被重叠扫描。在理论上, 视场边缘最稀疏的点能够被整周扫

描到, 视场内的被测物体能获得较为完整的投影数据, 重建图像质量较好。

根据上述分析可知, 螺距  $h$  和变量  $T$  会对扫描速度以及重建结果产生重要影响, 我们将  $h$  和  $T$  的比值定义为  $r$ , 即  $r = h/T$ 。当  $r = 1$  时,  $h$  与  $T$  相等, 增大  $r$ , 扫描速度会提高, 单位时间内可以扫描更长的物体, 但是获取的投影数据稀疏, 图像质量下降; 减小  $r$ , 扫描速度降低, 但能获得较高质量的图像。在 TS-SCT 系统中, 当  $r \leq 1/2$  时, 可获得较好质量的重建图像。

### 2.3 TS-SCT FDK 算法

由于 FDK 算法是一种近似重建算法, 具有算法复杂度低、计算效率高且易于并行加速等优点, 适用于商业 CT, 因此本文研究了基于螺旋 FDK 算法<sup>[20]</sup>的 TS-SCT FDK 算法。该算法的扫描结构示意图如图 4 所示, 其中仅显示了一组射线源-探测器。本文推导的 TS-SCT FDK 采用平板探测器, 分

别用  $u$  和  $v$  表示探测器排方向和列方向的坐标。设三个探测器获得的投影数据分别为  $p_1(\theta, u, v)$ 、 $p_2(\theta + 2\pi/3, u, v)$ 、 $p_3(\theta + 4\pi/3, u, v)$ ，重建图像为  $f(x, y, z)$ 。TS-SCT FDK 算法主要包括以下四个步骤。

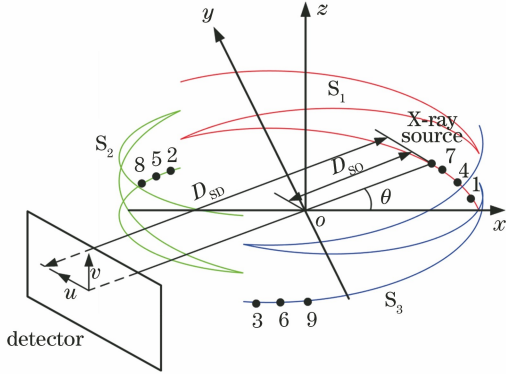


图 4 TS-SCT 扫描结构示意图

Fig. 4 Structural diagram of TS-SCT scanning

1) 对三个探测器采集到的投影数据进行整理。

对三个探测器采集到的投影数据进行整理，三组射线源-探测器每转动一个角度后，按照  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  的顺序依次将对应的探测器采集到的投影数据进行编号。如图 4 所示，数字表示编号。最后将所有投影数据按照编号从小到大进行排序，整理为一个投影数据。设整理后的投影数据为  $p(s, u, v)$ ， $s$  表示投影角度。

2) 对投影数据进行加权预处理。

将投影到探测器的锥束射线看作是由具有不同倾斜角度的扇形束一层层叠起来的，因此对每一层扇形束进行加权处理，有

$$p'(s, u, v) = \frac{D_{SO}}{\sqrt{D_{SD}^2 + u^2 + v^2}} p(s, u, v). \quad (5)$$

3) 对加权处理后的投影数据进行卷积滤波。

对投影数据沿着探测器行方向进行卷积滤波，常用的滤波函数有 Ram-Lak、Sheep-Logan 等。用  $h(u)$  表示滤波器卷积核函数，则

$$P(s, u, v) = p'(s, u, v) * h(u), \quad (6)$$

式中： $*$  表示卷积运算。

4) 对滤波后的投影数据进行加权反投影。

在理论上，每组射线源-探测器转动  $120^\circ$  即可获得被测物体  $360^\circ$  的投影数据，即三条“之”字形包含着被测物体某一段的  $360^\circ$  投影数据。因此可以进行分段重建，先判断待重建点所在的位置，然后取得重建点所在的整条“之”字形的投影数据进行加权反投影，即

$$f(x, y, z) = \int_{s(n)} \frac{1}{U^2} P(s, u, v) ds, \quad (7)$$

其中

$$U = \frac{D_{SO} - x \cos s - y \sin s}{D_{SD}}, \quad (8)$$

$$u = D_{SD} \frac{-x \sin s + y \cos s}{D_{SO} - x \cos s - y \sin s}, \quad (9)$$

$$v = D_{SD} \frac{z - S_{1z}}{D_{SO} - x \cos s - y \sin s}, \quad (10)$$

$$n \in [(j-1) \times 3m + 1, j \times 3m], \quad (11)$$

式中： $S_{1z}$  表示射线源  $S_1$  在  $z$  方向的步进距离； $m$  表示一个射线源摆动一次的采样点数； $n$  表示投影数据编号； $s(n)$  表示按编号对角度进行取值； $f(x, y, z)$  表示重建图像。

## 2.4 系统结构

根据 TS-SCT 扫描方式，初步设计了一种 TS-SCT 系统结构。如图 5 所示，系统采用卧式结构，主要构件为一中空齿圈，齿圈安装于轴承上，可以正反向转动。齿圈中空部位设有轴向传送装置，用来承载和传送检测对象。齿圈上均匀布置三组间隔  $120^\circ$  的射线源与探测器，三组射线源与探测器处于同一平面；三组射线源焦点到旋转中心的距离相等，三组探测器中心到旋转中心的距离相等；每组射线源与探测器相对布置，且射线源焦点与探测器中心连线垂直于中心轴。齿圈外部布置有带有减速器的伺服电机，电机通过齿轮传动的方式驱动中空齿圈转动，进而带动射线源和探测器转动。通过设置伺服电机的正反向转动，可以实现三组射线源和探测器的同步往复摆动。

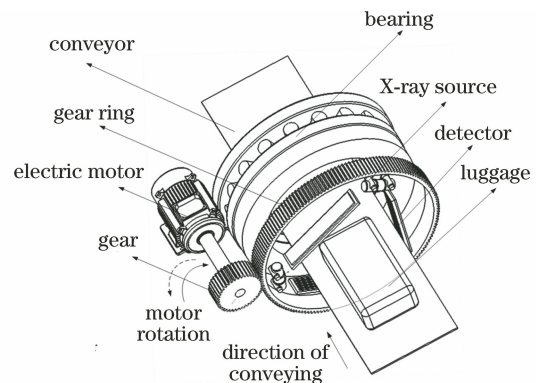


图 5 TS-SCT 系统结构示意图

Fig. 5 Structural diagram of TS-SCT system

在扫描过程中，检测对象始终保持沿水平轴向的直线运动，三组射线源和探测器先向同一方向旋转  $120^\circ$ ，同时射线源发出 X 射线，射线穿透检测对象后被另一侧相对应的探测器接收，从而实现数据

采集。三组射线源和探测器转动  $120^\circ$  后,再向相反方向旋转  $120^\circ$  并进行下一组数据采集。由于摆动过程中有换向和加减速,CT 扫描时通过三组射线源往复摆动和传送装置的进床运动,实现螺旋联动;同时通过时空同步控制,实现数据采集与检测对象几何位置的对应。即进床距离与旋转角度相匹配,数据采集与旋转角度同步,保证每次采样时,旋转角度的增量和被测物体的进床距离不变,最终实现三源摆动螺旋 CT 扫描。

### 3 仿真实验

为了验证 TS-SCT 方法的可行性,本文设计了相应的仿真实验,所有投影数据均采用 TS-SCT FDK 算法进行重建,编程环境为 MATLAB R2020a。在仿真实验中,探测器大小为  $250 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ ,探测器单元大小为  $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ 。射线源到旋转轴的距离与射线源到探测器的距离分别为  $500 \text{ mm}$  和  $1000 \text{ mm}$ 。设计一个类似行李箱的模体进行扫描,模体大小为  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 。如图 6 所示,模体中的圆柱体具有不同的灰度值。在扫描过程中,每组射线源-探测器摆动一次,均匀采集  $300$  个角度的投影数据。由(4)式可得, $T$  为  $80 \text{ mm}$ 。为了研究  $r$  对重建结果的影响,本文设计了四组实验进行对比分析, $r$  分别为  $1/4$ 、 $1/2$ 、 $3/4$ 、 $1$ ,对应的  $h$  为  $20$ 、 $40$ 、 $60$ 、 $80 \text{ mm}$ ,摆动次数分别为  $10$ 、 $5$ 、 $3$ 、 $3$ 。具体仿真实验

参数如表 1 所示,重建图像大小为  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 。

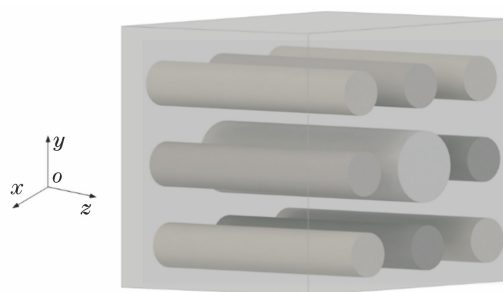


图 6 行李箱模体

Fig. 6 Luggage phantom

表 1 仿真参数

Table 1 Parameters for simulation

Parameter	Value
$D_{SD}/\text{mm}$	1000
$D_{SO}/\text{mm}$	500
$T/\text{mm}$	80
Pixel size / ( $\text{mm} \times \text{mm}$ )	$0.8 \times 0.8$
Size of detector array / ( $\text{pixel} \times \text{pixel}$ )	$250 \times 512$
Number of projections per swing	$300 \times 3$
Size of reconstruction matrix / ( $\text{pixel} \times \text{pixel} \times \text{pixel}$ )	$256 \times 256 \times 256$

仿真实验重建结果如图 7 所示。图 7(a)~(e) 中重建点所在位置为“之”字线的最中间,即图 2(b) 上的  $a$  点,图 7(f)~(j) 中重建点所在位置为“之”字线的拐角处,即图 2(b) 上的  $b$  点。对比图 7(b)~

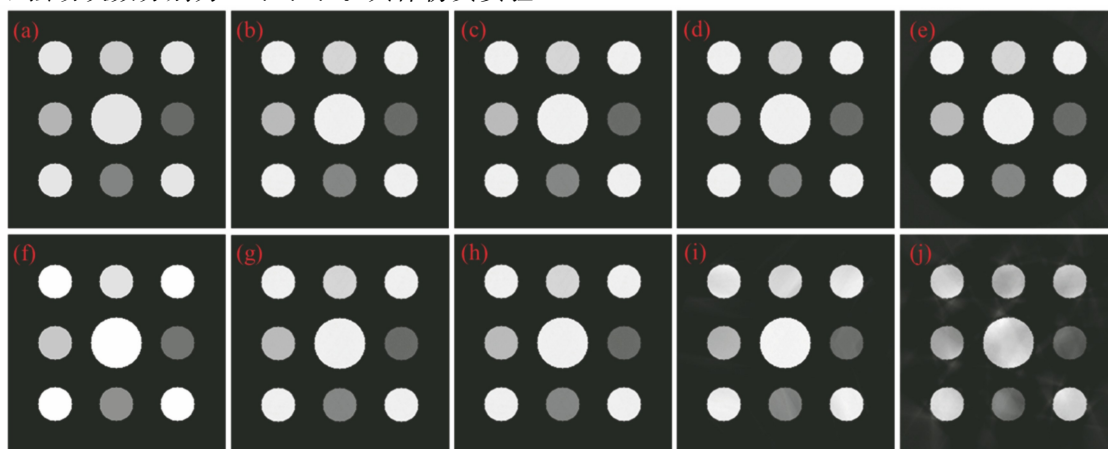


图 7 仿真实验的重建结果。(a) 模体在  $z$  方向上的第 128 层原始图像; $r$  分别为 (b)  $1/4$ 、(c)  $1/2$ 、(d)  $3/4$  和 (e)  $1$  时  $z$  方向上的第 128 层重建图像;(f) 模体在  $z$  方向上的第 154 层原始图像; $r$  分别为 (g)  $1/4$ 、(h)  $1/2$ 、(i)  $3/4$  和 (j)  $1$  时  $z$  方向上的第 154 层重建图像

Fig. 7 Reconstructed results from simulation experiment. (a)  $128^{\text{th}}$  layer original image of phantom in  $z$ -direction;  $128^{\text{th}}$  layer reconstructed images in  $z$ -direction for  $r$  of (b)  $1/4$ , (c)  $1/2$ , (d)  $3/4$ , and (e)  $1$ ; (f)  $154^{\text{th}}$  layer original image of phantom in  $z$ -direction;  $154^{\text{th}}$  layer reconstructed images in  $z$ -direction for  $r$  of (g)  $1/4$ , (h)  $1/2$ , (i)  $3/4$ , and (j)  $1$

(e)可以明显看出,在  $r=1/4$  和  $r=1/2$  时,重建结果较好;随着  $r$  值的增大,图像模糊,出现一些伪影,图像质量降低。图 7(g)~(j)也呈现出相似的规律。 $r$  值的逐渐增加会导致采集的投影数据逐渐稀疏,进而重建图像质量下降。此外,对比图 7(c)~(e)和图 7(h)~(j)可以看出,在  $r$  值逐渐增大的过程中,重建结果在  $z$  方向上第 128 层切片图像中出现的伪影明显比第 154 层少。综上分析可以得出:1) 随着  $r$  的增大,图像质量逐渐变差,即当  $r \leq 1/2$  时,重建图像能够获得较为理想的结果;2) 位于“之”字线中间部分的待重建点,重建图像质量受  $r$  的影响较小;位于“之”字线拐角处的待重建点,受  $r$  的影响较大。

为了进一步客观评价 TS-SCT FDK 算法的重建图像质量,采用均方根误差(RMSE)、峰值信噪比(PSNR)、结构相似性(SSIM)三组量化指标。不同  $r$  值下不同层重建图像的量化指标如表 2 所示,可以看出,当  $r=1/4$  时,切片重建图像的量化指标最好, $r=1/2$  时的重建结果和  $r=1/4$  时的重建结果差别不大,随着  $r$  的增大,重建图像的质量明显下降。对比第 128 层和第 154 层切片图像指标可知,在  $r$  值由  $1/2$  增大至 1 的过程中,第 128 层切片图像的各项量化指标优于第 154 层切片图像,说明第 128 层重建图像所处位置受  $r$  值的影响较小。

以上仿真结果证明了 TS-SCT FDK 算法的有效性,也证明了当  $r \leq 1/2$  时,TS-SCT 能够获得高质量重建图像。

表 2 不同  $r$  值下不同层重建图像的量化指标Table 2 Quantification indexes of reconstructed images in different layers for different  $r$  values

Layer No.	$r$	RMSE	PSNR	SSIM
128	1/4	0.0358	28.8885	0.9933
	1/2	0.0359	28.8884	0.9933
	3/4	0.0360	28.8859	0.9933
	1	0.0429	27.3515	0.9922
154	1/4	0.0361	28.8476	0.9933
	1/2	0.0361	28.8466	0.9933
	3/4	0.0421	27.512	0.9914
	1	0.0994	20.0549	0.9503

## 4 模拟实验

为了进一步验证 TS-SCT 方法的可行性,我们利用现有 CT 系统进行模拟成像实验,即用单射线源-探测器螺旋 CT 系统进行三次不同起始角的摆动螺旋扫描以模拟 TS-SCT 扫描。实验系统由射线源、探测器以及机械运动部件组成,如图 8(a)所示。射线源和探测器通过托板被安装在直线导轨上,利用滑台内部的电机驱动实现沿  $z$  轴的直线运动,扫描物体放置在可正反旋转的精密转台上。在数据采集过程中,射线源和探测器沿  $z$  轴直线运动,同时被测物体随转台绕  $z$  轴在  $0^\circ \sim 120^\circ$  范围内往复转动,实现射线源  $S_1$  摆动螺旋扫描。射线源和探测器作同步直线运动时,被测物体随转台分别在  $120^\circ \sim 240^\circ$  和  $240^\circ \sim 360^\circ$  范围内往复摆动,可模拟  $S_2$  和  $S_3$  摆动螺旋扫描。

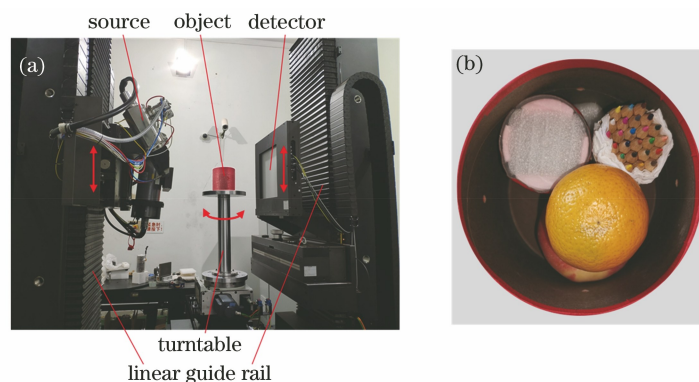


图 8 模拟实验。(a)实验系统;(b)检测样品照片

Fig. 8 Simulation experiment. (a) Experimental system; (b) photo of test sample

利用上述实验系统进行扫描实验:探测器的最大像元矩阵大小为  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ ,像元大小为  $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ ,射线源到旋转轴与射线源到探测器的距离分别为  $500 \text{ mm}$  和  $1000 \text{ mm}$ 。采用图 8(b)所示的物体作为检测样品,包含彩铅、苹果、

橘子和豆子。在验证  $r$  对重建图像质量的影响时,先确定扫描时的螺距  $h$  为  $40 \text{ mm}$ ,摆动三次,通过改变有效探测器高度来改变  $T$ ,进而改变  $r$  的值,设置三组实验,观察相同层数、不同  $r$  值下的重建图像质量。第一组实验探测器像素大小为  $250 \text{ pixel} \times$

512 pixel,  $T=80$  mm,  $r=1/2$ ; 第二组实验探测器像素大小为 200 pixel  $\times$  512 pixel,  $T=64$  mm,  $r=5/8$ ; 第三组实验探测器像素大小为 125 pixel  $\times$  512 pixel,  $T=40$  mm,  $r=1$ 。具体扫描参数如表 3 所示。

表 3 模拟实验参数

Table 3 Parameters for simulation experiment

Parameter	Value
Tube voltage /kV	150
Tube current / $\mu$ A	1500
$D_{SD}$ /mm	1000
$D_{SO}$ /mm	500
Pixel size / (mm $\times$ mm)	0.8 $\times$ 0.8
Pitch /mm	40
Source swing times	3
Number of projections per swing	300 $\times$ 3
Size of reconstruction matrix / (pixel $\times$ pixel $\times$ pixel)	512 $\times$ 512 $\times$ 300

三维重建的伪彩色图像如图 9 所示。可以看出,三组实验结果都为完整清晰的三维图像。但随

着  $r$  的增大,重建结果逐渐变差。重建结果的切片图像如图 10 所示。如图 10(a)~(c)所示,重建点所在位置为“之”字线的最中间,即图 2(b)上的  $a$  点;如图 10(d)~(f)所示,重建点所在位置为“之”字线的拐角处,即图 2(b)上的  $b$  点。对比从左到右三列图像,可以看出,图 10(a)和图 10(d)的图像边缘清晰、细节丰富,豆子和铅笔杆棱角非常分明,苹果没有明显伪影;图 10(b)和图 10(a)差别不大,图 10(e)中出现少量伪影,铅笔棱角处出现轻微模糊现象,苹果部分出现条状伪影;图 10(c)也出现轻微模糊现象,但伪影不明显,图 10(f)中的条状伪影较多,图像边缘模糊且细节损失较多。此外,在  $r$  值逐渐增大的过程中,  $z$  方向上第 150 层切片图像中的伪影明显比第 200 层少。综上所述,可以得出结论: 1) 当  $r=1/2$  时,能够获得较为理想的重建结果,随着  $r$  的增大,图像质量逐渐变差; 2) 位于“之”字线中间部分的待重建点,受  $r$  的影响较小;位于“之”字线拐角处的待重建点,受  $r$  的影响较大。

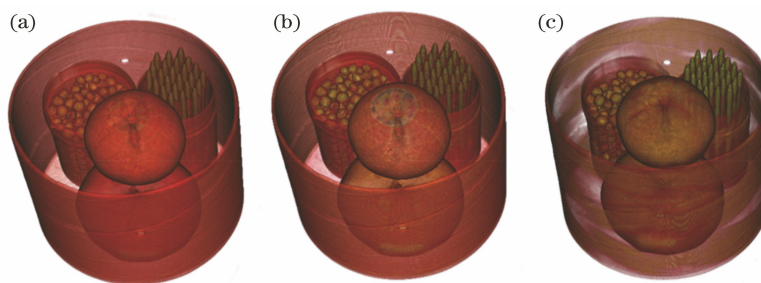


图 9 三维重建的伪彩色图。(a)  $r=1/2$ ; (b)  $r=5/8$ ; (c)  $r=1$

Fig. 9 3D reconstructed pseudo-color images. (a)  $r=1/2$ ; (b)  $r=5/8$ ; (c)  $r=1$

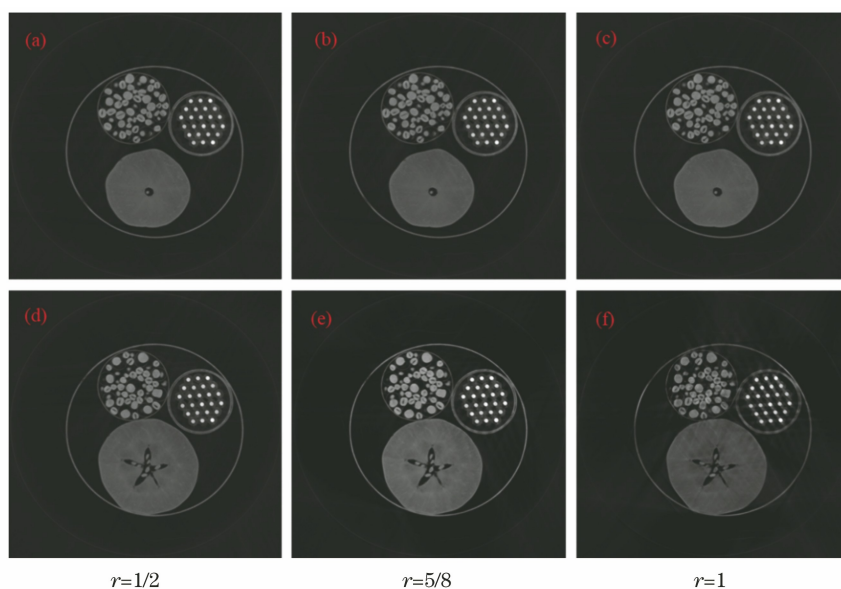


图 10 重建的切片图像。(a)~(c)在  $z$  方向上的第 150 层切片图像;(d)~(f)在  $z$  方向上的第 200 层切片图像

Fig. 10 Reconstructed section images. (a)~(c) 150<sup>th</sup> layer images in  $z$ -direction; (d)~(f) 200<sup>th</sup> layer images in  $z$ -direction



模拟实验的重建结果验证了 TS-SCT FDK 算法的有效性及 TS-SCT 的可行性,同时也验证了  $r$  对模拟实验重建图像质量的影响,与仿真实验结果一致。

## 5 结 论

提出一种 TS-SCT 方法,实现了连续扫描和三维成像。TS-SCT 扫描时,每组射线源-探测器只需在  $120^\circ$  角度范围内摆动;利用电机、齿轮、齿圈等传动机构带动射线源-探测器进行往复摆动,同时利用电缆进行电力以及数据传输,避免使用传统 CT 滑环部件,选用比滑环耐磨损且易于制造、维护的转动部件。

建立了 TS-SCT 几何模型,分析了扫描方式和扫描参数。与传统螺旋 CT 类似,TS-SCT 扫描也存在一个与扫描效率和重建图像质量相关的参数  $r$ 。根据 TS-SCT 扫描方式,初步设计了一种用于安检的 CT 系统结构。推导了用于 TS-SCT 的 FDK 算法,并设计了仿真实验和模拟实验。实验结果证明:TS-SCT FDK 算法正确有效,TS-SCT 方法可以获得被测物体的三维结构,可用于安检领域;当  $r$  较小( $r \leq 1/2$ )时,扫描速度慢,但重建图像质量好;当  $r$  较大( $r > 1/2$ )时,扫描速度快,但随着  $r$  的增大,图像质量变差;位于摆动螺旋轨迹“之”字线中间部分的待重建点受  $r$  的影响较小;位于“之”字线拐角处的待重建点受  $r$  的影响较大。因此,为了保证重建图像的质量,建议  $r \leq 1/2$ 。

后续将进一步研究 TS-SCT 算法,在增大  $r$  的同时保持重建图像的质量,以提高成像效率;研究三组射线源分别使用不同的能量进行扫描成像的可行性,探究三能有限角 CT 材料分解算法<sup>[24-25]</sup>,用于危险品识别。

## 参 考 文 献

- [1] Cai Y F, Chen T Y, Wang J, et al. Image noise reduction in computed tomography with non-local means algorithm based on adaptive filtering coefficients[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0710001.  
蔡玉芳, 陈桃艳, 王珏, 等. 基于自适应滤波系数的非局部均值计算机层析成像的图像降噪方法[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0710001.
- [2] Tian Z J, Yu H J, Wang L B, et al. Orthogonal translation computed laminography[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 2211002.
- [3] Wang S Y, Wu W W, Gong C C, et al. Study of parallel translation computed laminography imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1211002.  
王少宇, 伍伟文, 龚长城, 等. 相对平行直线扫描计算机分层成像研究[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1211002.
- [4] Wu W L, Li Y J, Sang B, et al. Application of computed tomography in explosives detection[J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2005, 14(1): 24-32.  
吴万龙, 李元景, 桑斌, 等. CT 技术在安检领域的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2005, 14(1): 24-32.
- [5] Zheng J Z, Lu S D. Review of the application of computed tomography technology in safety inspection domain[J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2012, 21(1): 157-165.  
郑金州, 鲁绍栋. CT 技术在安检领域应用综述[J]. CT 理论与应用研究, 2012, 21(1): 157-165.
- [6] Ginat D T, Gupta R. Advances in computed tomography imaging technology[J]. Annual Review of Biomedical Engineering, 2014, 16: 431-453.
- [7] Jin X, Zhang S Y, Li L, et al. A dual-energy stationary CT system based on dual-plane scanning mode[J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2020, 29(1): 31-37.  
金鑫, 张思远, 李亮, 等. 一种基于双平面扫描方式的双能静态 CT 系统[J]. CT 理论与应用研究, 2020, 29(1): 31-37.
- [8] Wu W W, Yu H Y, Gong C C, et al. Swinging multi-source industrial CT systems for aperiodic dynamic imaging[J]. Optics Express, 2017, 25(20): 24215-24235.
- [9] Yu H J, Wu W W, Chen P, et al. Image gradient  $L_0$ -norm based PICCS for swinging multi-source CT reconstruction[J]. Optics Express, 2019, 27(4): 5264-5279.
- [10] Grangeat P. Mathematical framework of cone beam 3D reconstruction via the first derivative of the radon transform[M]//Herman G T, Louis A K, Natterer F. Mathematical methods in tomography. Lecture notes in mathematics. Heidelberg: Springer, 1991, 1497: 66-97.
- [11] Tam K C, Samarasekera S, Sauer F. Exact cone beam CT with a spiral scan[J]. Physics in Medicine and Biology, 1998, 43(4): 1015-1024.
- [12] Kudo H, Noo F, Defrise M. Quasi-exact filtered backprojection algorithm for long-object problem in helical cone-beam tomography [J]. IEEE

- Transactions on Medical Imaging, 2000, 19(9): 902-921.
- [13] Defrise M, Noo F, Kudo H. A solution to the long-object problem in helical cone-beam tomography[J]. Physics in Medicine and Biology, 2000, 45(3): 623-643.
- [14] Katsevich A. Theoretically exact FBP-type inversion algorithm for spiral CT[J]. ReCALL, 2001, 62(6): 1-3.
- [15] Zou Y, Pan X C. Exact image reconstruction on PI-lines from minimum data in helical cone-beam CT [J]. Physics in Medicine and Biology, 2004, 49(6): 941-959.
- [16] Yu H Y, Zhao S Y, Ye Y B, et al. Exact BPF and FBP algorithms for nonstandard saddle curves [J]. Medical Physics, 2005, 32(11): 3305-3312.
- [17] Ye Y B, Zhao S Y, Yu H Y, et al. A general exact reconstruction for cone-beam CT via backprojection-filtration [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2005, 24(9): 1190-1198.
- [18] Yu H Y, Ye Y B, Zhao S Y, et al. Local ROI reconstruction via generalized FBP and BPF algorithms along more flexible curves [J]. International Journal of Biomedical Imaging, 2006, 2006: 14989.
- [19] Feldkamp L A, Davis L C, Kress J W. Practical cone-beam algorithm [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1984, A1(6): 612-619.
- [20] Wang G, Lin T H, Cheng P, et al. A general cone-beam reconstruction algorithm [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1993, 12(3): 486-496.
- [21] Grass M, Köhler T, Proksa R. 3D cone-beam CT reconstruction for circular trajectories[J]. Physics in Medicine and Biology, 2000, 45(2): 329-347.
- [22] Grass M, Köhler T, Proksa R. Angular weighted hybrid cone-beam CT reconstruction for circular trajectories[J]. Physics in Medicine and Biology, 2001, 46(6): 1595-1610.
- [23] Turbell H, Danielsson P E. The PI-method: non-redundant data capture and efficient reconstruction for helical cone-beam CT [C] // 1998 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. 1998 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, November 8-14, 1998, Toronto, ON, Canada. New York: IEEE Press, 1998: 1424-1425.
- [24] Feng J, Yu H J, Wang S Y, et al. Image-domain based material decomposition by multi-constraint optimization for spectral CT[J]. IEEE Access, 2020, 8: 155450-155458.
- [25] Wu W W, Yu H J, Chen P J, et al. DLIMD: dictionary learning based image-domain material decomposition for spectral CT [J]. Physics in Medicine and Biology, 2020, 65(24): 245006.