

三结构各向同性包覆燃料颗粒相衬 CT 图像的 噪声和伪像抑制方法初探

彭亚辉¹, 曹旭阳¹, 陈后金¹, 李艳凤¹, 李居朋¹, 王贤刚²

(1. 北京交通大学, 北京 100044; 2. 清华大学, 北京 100086)

摘 要: 对三结构各向同性包覆燃料颗粒相衬 CT 图像的噪声和伪像抑制进行了初步探索, 提出了三种方法分别抑制由探测器随机噪声、非线性漂移以及灵敏度非均匀性所导致的图像噪声或伪像. 对抑制噪声或伪像前后的图像质量进行了主观评价以及定量分析, 结果表明, 本文提出的三种方法在有效抑制上述三种类型噪声或伪像的同时仍然能够保证重建图像中不同结构间边缘的清晰度.

关键词: 相衬计算机断层成像; 三结构各向同性包覆燃料颗粒; 噪声; 伪像; 抑制

中图分类号: TP317. 4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2019)02-0448-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.02.027

Preliminary Study on Noise and Artifact Reduction in Phase-Contrast CT Image of Tristructural-Isotropic Coated Fuel Particle

PENG Ya-hui¹, CAO Xu-yang¹, CHEN Hou-jin¹, LI Yan-feng¹, LI Ju-peng¹, WANG Xian-gang²

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100086, China)

Abstract: The purpose of the study was to reduce the noise and artifact in the phase-contrast computed tomography image of a tristructural-isotropic coated fuel particle. Three algorithms were proposed to reduce the noise and artifacts caused by the stochastic noise, non-linear drifting, and non-uniform sensitivity of the imaging detector, respectively. Subjective and quantitative evaluations were conducted before and after applying the algorithms. The results demonstrated that the proposed algorithms effectively reduced the three types of noise and artifacts, leaving the boundaries between different structures intact.

Key words: phase-contrast computed tomography; tristructural-isotropic coated fuel particle; noise; artifact; reduction

1 引言

三结构各向同性(tristructural isotropic, TRISO)包覆燃料颗粒是目前高温气冷堆采用的一种燃料元件^[1]. 典型的球形 TRISO 包覆燃料颗粒为五层结构, 从中心向外依次是包含铀元素的核心、疏松热解碳(pyrolytic carbon, PyC)层、内热解碳(inner pyrolytic carbon, I-PyC)层、碳化硅(silicon carbide, SiC)层和外热解碳(outer pyrolytic carbon, O-PyC)层(图1). 核心外面的四层包覆结构在阻挡裂变产物的释放和保持燃料颗粒的完整性中起着重要的作用, 其厚度和密度决定了燃料颗粒的安全性能. 制备完成后, 准确测量各结构的厚度可以确保燃料颗粒达到了设计要求.

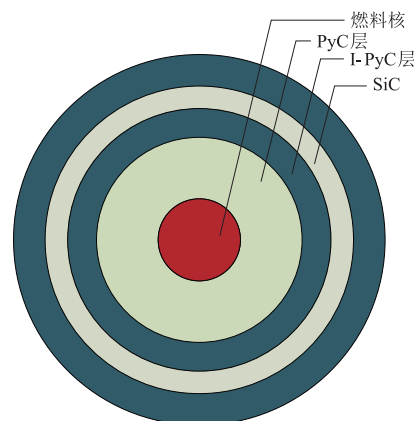


图1 TRISO包覆燃料颗粒五层结构示意图

计算机断层成像 (computed tomography, CT) 是一种广泛采用的三维断层成像技术,但在检测 TRISO 包覆燃料颗粒的应用中面临着挑战,基于物质吸收系数的常规 CT 重建图像无法产生足够的图像对比度来区分燃料颗粒中的不同结构.与常规 CT 技术不同,相衬 CT 依赖 X 射线在物体边缘的折射效应所产生的相位变化进行断层图像的重建.据估计,当 X 射线穿透低密度材料时,其相位变化产生的对比度是其吸收系数变化所导致对比度的约 1000 倍^[2].因此,采用相衬 CT 技术对 TRISO 包覆燃料颗粒成像有可能突破传统 CT 技术的限制,特别是在图像边缘部分,有可能获得更加丰富的信息^[3,4].

相衬 CT 技术要求 X 射线源具有单色性,因此往往采用同步辐射光源作为射线源.这不仅限制了相衬 CT 系统设计的灵活性,同时也对图像的信噪比产生了约束,导致图像对各种来源的噪声或者伪像相当敏感.如果不对这些噪声或伪像进行消除或者抑制,TRISO 包覆燃料颗粒的 CT 图像的边缘信息将受到极大的干扰,导致无法清晰区分 TRISO 包覆燃料颗粒中的各层结构,给后续的定量处理增加了难度.

文献中围绕 CT 数据和重建图像噪声及伪像抑制的研究主要集中在医用 CT 领域,特别是针对金属伪像和硬化伪像的消除^[5].在工业应用领域,国内从投影数据域内分析了图像线状和环状伪影的产生并提出了相应的抑制方法^[6,7].然而,在核工业 CT 应用领域中相衬 CT 重建图像中噪声和伪像的抑制工作鲜有详细且全面的报告.

针对 TRISO 包覆燃料颗粒相衬 CT 图像中由于探

测器的随机噪声、非线性漂移以及灵敏度非均匀性所导致的三种图像噪声或伪像,本文初步阐明了这些噪声或伪像在重建图像中的表现形式,并采用“先识别,后修正”的思路提出了对应的三种基于投影数据域的噪声和伪像抑制方法,并以定性和定量的方式评价了抑制方法的效果.

2 材料与数据采集

本文采用的 TRISO 包覆燃料颗粒为模拟样品,使用上海同步辐射光源进行相衬 CT 成像.采集的数据包括暗电流 (dark-field) 图像、平场 (flat-field) 图像和投影 (projection) 图像.投影图像矩阵大小为 2048×2048 ,像素边长 $1.3 \mu\text{m}$,共分 540 个视角在 $0^\circ \sim 179.67^\circ$ 内对 TRISO 包覆燃料进行均匀采样.数据采集后使用 Phase-sensitive x-ray Image processing and Tomography REconstruction (PITRE) 软件^[8]进行数据处理、相位恢复和 CT 断层图像重建.为更好地观察噪声和伪像抑制的效果,选择了常用的滤波反投影方法进行了 CT 断层图像重建^[9],采用其他重建方法不会在原理上显著影响本文的基本结论.

本文对 TRISO 包覆燃料颗粒的赤道面进行断层重建,因此仅展示经过 TRISO 包覆燃料颗粒赤道面投影数据的处理效果和 CT 重建图像.在数据获取中,调整 TRISO 包覆燃料颗粒赤道面包含系统的光学中心轴.因此投影数据满足 CT 重建的数据完备性要求.将 TRISO 赤道面的投影数据进行重新整理后,形成了该赤道面对应的正弦图 (sinogram),如图 2 所示.

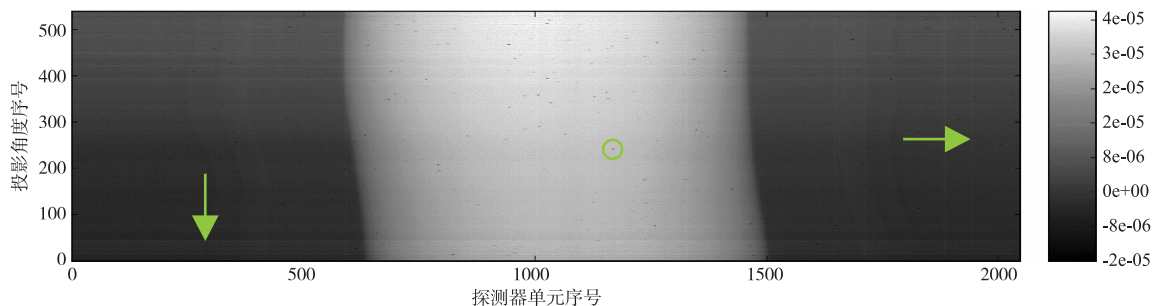


图2 带有噪声的原始正弦图,即投影数据.图中显示了探测器随机噪声(圆圈中的黑色小点),探测器漂移噪声(竖直箭头所指),和探测器灵敏度非均匀性噪声(水平箭头所指)

3 噪声和伪像特点与抑制方法

观察正弦图(图2),可见三类不同的噪声.首先,投影数据中存在的椒盐噪声,经过相位恢复后形成了在正弦图内随机出现的一类噪声,在本文中“随机噪声”进行指代.其次,正弦图同时显示了随不同投影视角发生变化的水平方向的条纹,该条纹与投影数据的采集时间相关,由于其表现与常见的探测器基线漂移

类似,在本文中“漂移噪声”进行指代.第三,在正弦图中存在着不十分明显的垂直方向的条纹,这些条纹对 CT 断层图像质量影响极大,在本文中“探测器灵敏度非均匀噪声”进行指代,以表明该噪声的产生与探测器不同探测单元灵敏度的密切关系.

上述在投影域中观察到的噪声和伪像并不满足传统意义上对“噪声”的定义,本文为行文方便,统一定义为“噪声”,与真实的,希望真正获取的“信号”数据相区

别. 针对这三类噪声, 本文在初步研究过程中提出了相应的抑制方法.

随机噪声 在包含随机噪声的局部放大图(图 3(a))中, 可以观察到随机噪声的典型特征: (1) 噪声只在水平方向出现; (2) 噪声灰度值在很窄的区域内先快速下降后快速上升, 呈脉冲状. 本文利用上述两个特性, 取图像水平方向上差分的绝对值, 然后寻找局部极大值^[10]即可定位到脉冲噪声. 具体步骤如下:

(1) 计算投影数据水平方向的差分, 取其绝对值.

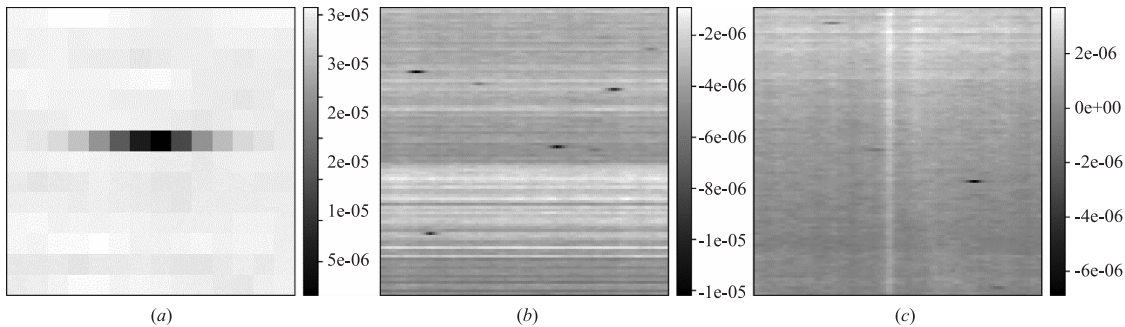


图3 放大后正弦图中三种探测器噪声示意图 (a) 正弦图中第367投影视角下某一探测器随机噪声区域; (b) 呈现为水平条纹状的探测器漂移噪声; (c) 呈现为垂直条纹状的探测器灵敏度非均匀噪声. 注意 (b) 与 (c) 中随机噪声并未去除

漂移噪声 由于探测器漂移的影响, 随着投影角度的变化, 投影数据的基线发生波动, 产生沿探测器单元方向(横向)的条纹(图 3(b)). 本文首先识别出不同投影角度下数据的相对“漂移”量, 然后将该漂移量从投影数据中移除, 从而校正该漂移噪声对 CT 重建图像的影响. 设计抑制漂移噪声的算法如下:

(1) 对投影数据中每个投影角度取前 m 个探测单元的数据进行低通滤波, 去除可能的高频噪声的影响.

(2) 对 1 中结果分别计算每个投影角度在前 m 个探测单元中的平均值, 本文设置 m 为 200.

(3) 以初始(0°)投影角度和终止(179.67°)投影角度平均值的均值为参考值, 计算每个投影角度平均值与参考值的差, 作为该投影角度的“漂移”量.

(4) 将 3 中得到的漂移量从对应的投影视角数据中减去.

非均匀噪声 探测器各单元的探测效率往往不一致, 在正弦图中显示为沿投影角度方向(纵向)的条纹(图 3(c)), 在重建图像中则表现为以重建图像中心为圆心的深浅不一致的同心圆. 本文同样首先识别不同探测器单元灵敏度不一致所产生的数据偏移, 再将该偏移量从探测器单元中移除. 具体操作步骤如下.

(1) 分别计算每个探测单元在所有投影角度上的平均值, 得到平均探测器响应.

(2) 使用中值滤波, 对 1 中得到的平均探测器响应进行低通滤波, 结果为探测器理想响应.

(3) 将 1 中得到的平均探测器响应减去 2 中得到

(2) 计算第 1 步得到图像的局部极大值, 得到二值图像, 二值图像前景为检测到的局部极大值区域, 背景为正常区域.

(3) 根据两个相邻前景的距离信息修正二值图像. 由于噪声脉冲中心位置的差分往往比较小, 因此在第 2 步会被识别为正常区域, 这里将距离小于阈值的两个前景合并为一个, 本文中阈值取为 3, 从而能够完整地识别出以脉冲状出现的随机噪声.

(4) 将检测到的噪声区域填充为非局部均值^[11].

的探测理想响应估计, 得到不同探测器单元灵敏度不一致产生的数据偏移.

(4) 将各探测器单元的数据偏移从原始正弦图中减去.

4 评价指标

除了使用肉眼观察噪声抑制前后正弦图和重建 CT 图像的质量, 客观定量的图像质量指标也被用来评价噪声抑制方法的效果.

本文采用图像灰度值的标准差来定量评价图像的噪声高低, 同时采用对比度噪声比(contrast-to-noise ratio, CNR)评价噪声抑制前后图像对比度相对噪声的变化规律. 在重建图像的各个 TRISO 包覆层中分别在核心的上下左右选择大小一致的感兴趣区(region of interest, ROI), 本文选取大小为 40×40 的 ROIs, 计算各包覆层 ROI 方差平均值的平方根作为该包覆层的噪声水平指标. 该值随着图像噪声的减少而变小. 对比度噪声比的计算基于相同的 ROIs, 其中两种结构间的对比度定义为两种结构 ROI 均值的差, 而噪声定义为两种结构 ROI 方差平均值的平方根, 计算公式如下:

$$\text{CNR} = \frac{|\mu(s_1) - \mu(s_2)|}{\sqrt{\frac{\bar{\sigma}^2(s_1) + \bar{\sigma}^2(s_2)}{2}}}$$

式中, $\mu(s_i)$ 为结构 i 的所有 ROI 均值的平均值, $\bar{\sigma}(s_i)$ 为结构 i 的所有 ROI 方差平均值的平方根. 随着图像噪声的减少, CNR 应随之增大.

5 结果

在正弦图内分别抑制三种探测器噪声的效果如图 4 所示. 通过对比(图 3(a)与图 4(a))可见,探测器随机噪声获得了有效地抑制. 在随机噪声区域内的像素值得到了修正,并且修正后像素值与附近区域像素值的差别很难为肉眼所察觉. 同时可以观察到,除了在随机噪声出现的区域之外,该局部其他像素值依然保持原始值不变,这样能够尽可能地保持原始正弦图中的信息.

探测器漂移噪声(横向条纹)抑制后效果如图 4(b)所示. 与图 3(b)对比,抑制探测器漂移噪声后的正弦图在不同投影角度上的灰度分布显然更加均匀,存在于原始正弦图中呈水平条状分布的噪声受到了有效的抑制. 注意噪声抑制前后的灰度值差别比较大,为了

更好地显示漂移噪声的抑制效果,图 4(b)中使用的显示灰度窗与原始正弦图的灰度窗并不一致.

探测器灵敏度非均匀噪声(纵向条纹)的抑制效果同样可以对比图 4(c)与图 3(c)得到清晰的展示. 原本存在于局部区域中央的一条竖直高亮度条纹以及其他竖直条状分布的噪声被识别并移除后,局部正弦图区域中的包覆层边界显得更加清晰可见.

图 5 显示依次抑制探测器随机噪声、漂移噪声和灵敏度非均匀噪声后正弦图的效果. 与图 2 相对比,除了在靠近 TRISO 包覆燃料核心层边缘部分尚有部分非均匀噪声以外,原始正弦图中的三种噪声都得到了有效的抑制,各个包覆层的边缘更加清晰. 显然,消除非均匀噪声后的正弦图更有利于下一步精确的 CT 图像重建.

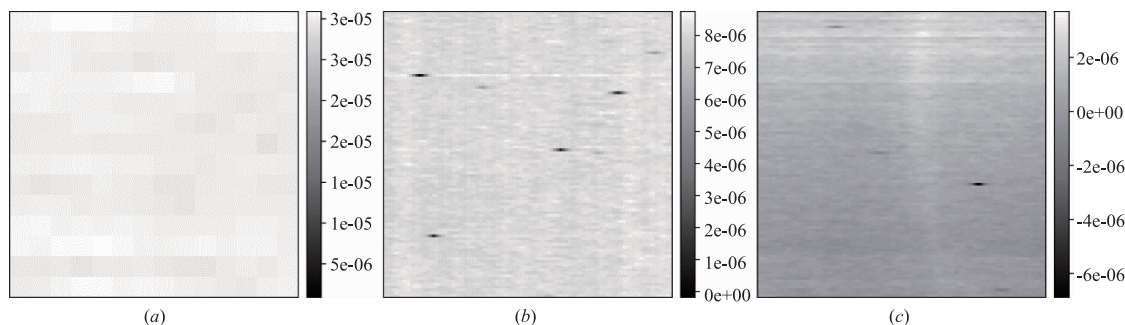


图4 (与图 3 对应) 放大后的正弦图显示了对三种探测器噪声分别抑制后的效果 (a) 第 367 个投影视角下探测器随机噪声的抑制效果(灰度显示窗口与图 3(a)一致); (b) 抑制水平条纹状的探测器漂移噪声后的效果(与图 3(b)对应,灰度显示窗口不一致); (c) 抑制竖直条纹状的探测器灵敏度非均匀噪声后的效果(灰度显示窗口与图 3(c)一致). 注意 (b) 与 (c) 中随机噪声并未去除

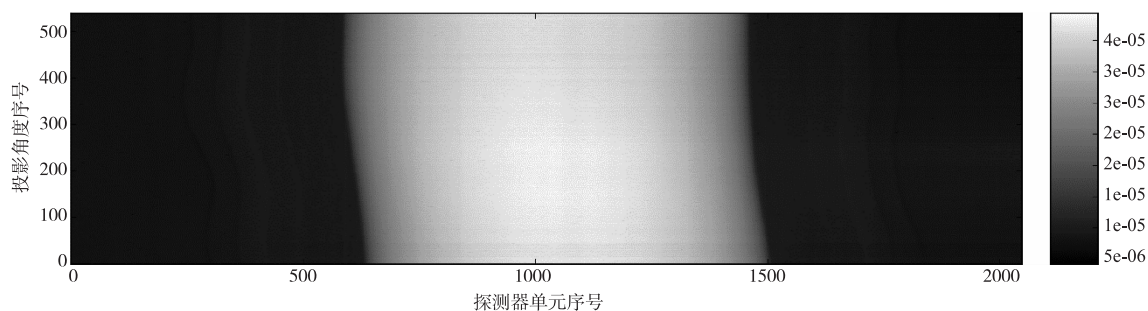


图5 同时抑制三种探测器噪声后的正弦图

图 6 显示依次抑制探测器随机噪声、漂移噪声和灵敏度非均匀噪声后的 CT 重建图像. 随着抑制噪声种类的增加,CT 重建图像中的伪影出现得越少. 全部三种噪声都得到抑制后,TRISO 包覆燃料颗粒中各包覆结构的边缘已经比较清晰.

不同重建图像中噪声水平的对比如表 1 所示. 从表 1 看出,随机噪声对图像均匀程度影响最大,其次是

环状伪影;由非线性漂移带来的投影图像水平条纹对重建过程的影响并不大,但是结合图 6 中 C、D 和表 1 最后两列数据来看,非线性漂移的纠正对保持图像边缘,平滑图像起到一定作用. 实验计算了相邻两层之间的 CNR 如表 2 所示;去除噪声种类越多,其 CNR 值就越大,符合定性分析的结果.

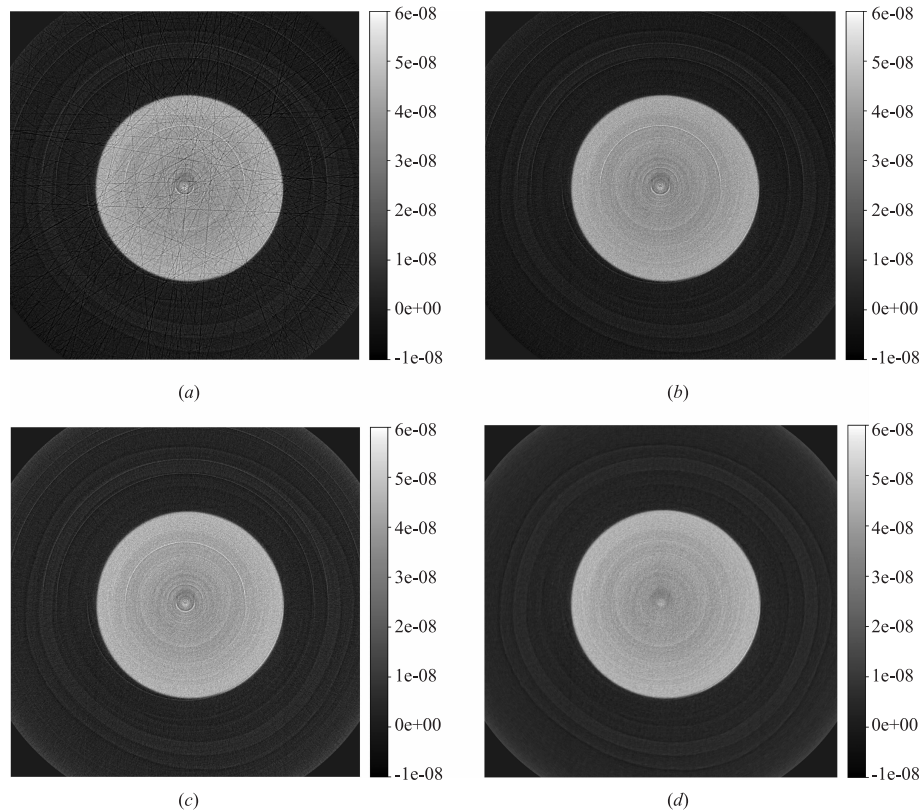


图6 CT重建图像.由上到下,由左到右依次为:(a)原始数据重建结果;(b)抑制随机噪声后的重建结果;(c)同时抑制漂移噪声后的重建结果;(d)三种噪声全部抑制后的重建结果

表1 重建CT图像中不同包覆层噪声水平对比

	第一层 (10^{-9})	第二层 (10^{-9})	第三层 (10^{-9})	第四层 (10^{-9})	第五层 (10^{-9})
原始图像	5.498	5.198	4.996	4.834	6.069
去除随机噪声	3.536	3.415	3.540	3.350	3.836
去除非均匀噪声	5.446	5.071	4.794	4.780	6.039
去除漂移噪声	5.499	5.197	4.994	4.834	6.070
去除随机噪声和非均匀噪声	3.442	3.285	3.250	3.265	3.782
去除三种噪声	3.452	3.294	3.258	3.258	3.783

表2 重建CT图像中相邻包覆层之间的CNR值

	1层-2层 (10^8)	2层-3层 (10^8)	3层-4层 (10^8)	4层-5层 (10^8)
原始图像	3.318	0.2949	0.2161	9.648
去除随机噪声	7.742	0.7726	0.4218	22.76
去除非均匀噪声	3.439	0.3274	0.2836	9.757
去除漂移噪声	3.364	0.3349	0.1719	9.624
去除随机噪声和非均匀噪声	8.295	0.9006	0.5886	23.56
去除三种噪声	8.352	0.9841	0.4826	23.52

6 讨论

在CT重建过程中,通过后处理抑制探测器噪声或伪像的方法可以大致分为两类:一类是先对投影数据进行噪声或伪像抑制,然后利用抑制后的数据重建图

像;另一类是直接对重建后的图像进行噪声或伪像抑制.第二类方法的噪声抑制效果往往会受制于CT重建算法的限制,例如本文采用的重建算法是FBP算法,在对重建图像进行去噪处理时需要考虑不同性质的噪声经过重建算法处理后在图像域中的表现形式,不仅不够直观,同时也可能会更加复杂^[12].本文采用的方法属于第一类,在投影域进行抑制处理,从根源上有效地减少了伪像在CT重建图像中的产生.

根据不同噪声或伪像的图像表现属性,我们分别设计了有别于常用CT图像去噪方法的三种算法,充分利用了TRISO包覆燃料颗粒相衬CT图像的特点,在最大程度保留原始投影数据的基础上有效地消除了其中包含的噪声或伪像.

在投影数据域进行随机噪声抑制的算法中,中值滤波是一种比较常用的去噪方法.然而该方法需要选择中值计算的窗口大小,该参数往往具有相当大的随意性.同时,中值滤波在抑制噪声的同时会不可避免的改变原始的投影数据,有可能会模糊真实存在于投影数据中的关键图像特征.考虑到上述限制,本文在抑制随机噪声时首先进行对噪声进行了检测,仅仅在检测到的噪声区域进行滤波操作,最大限度地避免了对原始投影数据的更改.

探测器输出漂移并非一种十分引人注意的噪声,这种噪声产生的原因可能是探测器电子学部分随时间发生基线漂移引起,是探测器输出整体同时发生的一种变化.这类噪声会导致重建 CT 图像的灰度值水平整体发生变化,在对 CT 图像灰度值的定量性质要求不高的情况下,该噪声的存在往往会被忽略.然而本文中的成像对象中包覆层的对比度噪声比在噪声抑制前后有较大变化,说明准确识别并抑制探测器漂移噪声具有实际意义.

探测器灵敏度非均匀性噪声是普遍存在的一类噪声,在重建图像上表现为环状伪影,如何有效地抑制探测器输出非均匀性造成的环状伪影尚未获得圆满的解决,一些常用的去除环状伪影的方法^[12,13]在本文涉及的投影数据中使用效果欠佳.本文汇报的结果有效地抑制了非均匀性噪声,其使用效果存在着一定的特殊性.

本文对 TRISO 包覆燃料相衬 CT 图像的噪声抑制进行了初步探索,在抑制探测器随机噪声、非线性漂移以及灵敏度非均匀性所导致的三种图像噪声的过程中,以先探测后清除的方针制定了噪声抑制方案.结果表明,本文采用的方法能够有效抑制三种类型噪声.噪声抑制对后续定量分析的效果有待进一步的研究和探索.

参考文献

- [1] 张永栋,林俊,张海青,等. 包覆燃料颗粒尺寸及其标准偏差对失效概率的影响[J]. 核技术,2016,39(12):69-74.
- [2] Yang M, Zhang J, Song S J, et al. Imaging and measuring methods for coating layer thickness of TRISO-coated fuel particles with high accuracy [J]. Ndt & E International, 2013,55(3):82-89.
- [3] Kim W K, Lee Y W, Cho M S, et al. Nondestructive measurement of the coating thickness for simulated TRISO-coated fuel particles by using phase contrast X-ray radiography [J]. Nuclear Engineering & Design, 2008, 238(12):3285-3291.
- [4] Yang M, Zhang J, Meng F, et al. Denoising method of X-ray phase contrast DR image for TRISO-coated fuel particles [J]. PARTICUOLOGY, 2013, 11(6):695-702.
- [5] Yu L, Leng S, Mccollough C H. Dual-energy CT-based monochromatic imaging [J]. Ajr American Journal of Roentgenology, 2012, 199(5 Suppl):S9-S15.

- [6] 王贤刚,张朝宗,郭志平. CT 图像线状伪像产生的原因和校正方法[J]. 核电子学与探测技术,2009,29(1):101-104.
- [7] 李俊江,胡少兴,李保磊,等. CT 图像环状伪影校正方法[J]. 北京航空航天大学学报,2007,33(11):1378-1382.
- [8] Chen R C, Dreossi D, Mancini L, et al. PITRE: Software for phase-sensitive X-ray image processing and tomography reconstruction [J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2012, 19(5):836-845.
- [9] Katsevich A. Theoretically exact filtered backprojection-type inversion algorithm for spiral CT [J]. Siam Journal on Applied Mathematics, 2002, 62(6):2012-2026.
- [10] Soille P. Morphological Image Analysis: Principles and Applications [M]. Springer-Verlag New York, Inc. 2003.
- [11] Buades A, Coll B, Morel J M. A non-local algorithm for image denoising [A]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on [C]. IEEE, 2005. 60-65 vol. 2.
- [12] Kim Y, Baek J, Hwang D. Ring artifact correction using detector line-ratios in computed tomography [J]. Optics Express, 2014, 22(11):13380-92.
- [13] Eldib M E, Hegazy M, Mun Y J, et al. A ring artifact correction method: validation by micro-CT imaging with flat-panel detectors and a 2D photon-counting detector [J]. Sensors, 2017, 17(2):269.

作者简介



彭亚辉 男,1975 年出生,博士,副教授,主要研究方向为信号处理,定量图像分析,CT 系统与图像重建.

E-mail: yhpeng@bjtu.edu.cn



王贤刚(通信作者) 男,1977 年出生,博士,副研究员,主要研究方向为 X 射线三维成像,剂量学,无损检测等.

E-mail: wangxiangang@tsinghua.edu.cn