

固体火箭发动机 CT 图像条状伪影校正

卢洪义¹, 陈庆贵^{1,2}, 周红梅³, 赵汝岩³, 张宗伟⁴, 喻舟⁵

(1. 海军航空工程学院 飞行器工程系, 山东 烟台 264001;

2. 海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛 266041;

3. 海军航空工程学院 七系, 山东 烟台 264001;

4. 中国人民解放军 91213 部队, 山东 烟台 264003;

5. 中国人民解放军 海军驻贵阳地区军事代表办事处 航空发动机办公室, 贵州 平坝 561102)

摘 要: 为了校正窄角扇束工业 CT 扫描重建的固体火箭发动机图像中的条状伪影, 分析了条状伪影的产生原因. 针对条状伪影是由重排和数据对齐后固体火箭发动机投影数据的非光滑连续性引起的, 提出了条状伪影校正的两种算法. 两种算法均以中间平移步数的投影数据为基准进行投影数据的重排, 一种将重排和数据对齐过程分开处理; 另一种将重排和数据对齐过程合并处理. 为了验证两种条状伪影校正算法的有效性, 采用窄角扇束工业 CT 对某型固体火箭发动机进行 3 种不同扫描步长的扫描和重建. 结果表明重排和数据对齐过程分开处理的校正算法只有在小步长扫描的情况下重建效果较好, 条状伪影较少; 而重排和数据对齐过程合并处理的校正算法在 3 种不同的扫描步长下图像重建质量均较好, 条状伪影较少.

关 键 词: 固体火箭发动机; 窄角扇束 CT; 条状伪影; 重排; 数据对齐

中图分类号: V435

文献标志码: A

Streak artifacts correction of solid rocket motor's CT image

LU Hong-yi¹, CHEN Qing-gui^{1,2}, ZHOU Hong-mei³,

ZHAO Ru-yan³, ZHANG Zong-wei⁴, YU Zhou⁵

(1. Department of Airborne Vehicle Engineering,

Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai Shandong 264001, China;

2. Qingdao Branch of Naval Aeronautical and Astronautical University,

Qingdao Shandong 266041, China;

3. No. 7 Department,

Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai Shandong 264001, China;

4. Troop 91213, the Chinese People's Liberation Army, Yantai Shandong 264003, China;

5. Aero-engine Office of Military Representatives Office of Navy in Guiyang,

the Chinese People's Liberation Army, Pingba Guizhou 561102, China)

Abstract: To correct streak artifacts in the computed tomography (CT) image of solid rocket motor (SRM), scanned by narrow fan-beam industrial CT (ICT), the reason for the streak artifacts was analyzed. Considering the streak artifacts were caused by the inconsistency of projection data of SRM after rebinning and data shake-up processes, two algorithms for the correction of streak artifacts were proposed. The two algorithms used the projection data in the half of the translation steps as the reference for the rebinning of projection data. For one algorithm, rebinning process and data shake-up process were considered as two

收稿日期: 2015-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(51005242)

作者简介: 卢洪义(1965—), 男, 山东莱阳人, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事固体火箭发动机使用工程研究.

processes. For the other, rebinning and data shake-up processes were considered as one process. To prove the effectiveness of the two algorithms, one SRM was scanned by narrow fan-beam ICT with three different scanning step sizes and SRM CT images were reconstructed by the two algorithms. Results show that the algorithm using rebinning and data shake-up as two processes performs well only if the scanning step size is small, and there are few streak artifacts in this situation. The other algorithm using rebinning and data shake-up as one process performs well and generates few streak artifacts in the situations of three different step sizes.

Key words: solid rocket motor; narrow fan-beam CT; streak artifacts; rebinning; data shake-up

工业计算机断层扫描成像(industrial computed tomography, ICT)在固体火箭发动机的无损检测中发挥着重要作用,其可实现固体火箭发动机缺陷的定量和定性判断^[1-3].然而,受图像重建算法、探测器和噪声等的影响,CT重建图像中往往存在着伪影,严重影响对固体火箭发动机缺陷的判断.条状伪影是其中的一种伪影,其产生是由于噪声、X射线管电弧、X射线管轴不稳定,探测器的暗电流、增益、非线性和辐射损伤及检测对象的移动和金属物质引起的数据损失等^[4].

针对条状伪影的去除,谷建伟等^[4]系统地介绍了条状伪影的形成原因和相应的校正方法,包括插值法、迭代去模糊法、马尔科夫随机场法和小波方法.牟轩沁等^[5]提出了基于 Helgasson-Ludwig (H-L)一致性条件的射束硬化校正方法,取得了较好的校正效果.张砚博等^[6]则提出了改进的基于 H-L 一致性条件的双多项式校正算法,取得了比传统的双多项式校正算法更好的条状伪影校正效果.余晓锬等^[7-8]研究了医学中金属植入物造成条状伪影的消除算法,首先对图像进行有效分割,然后分别采用多项式插值法和线性插值法来消除金属伪影和条状伪影,最后将两部分融合,取得了较单一地利用多项式插值或线性插值进行条状伪影校正更好的效果. Mory 等^[9]研究了逆滤波算法和迭代反卷积算法在四维心脏 CT 中去除条状伪影的应用,证明两种算法在心脏微 CT 仿真中是有效的,然而在四维人类心脏 C 型臂 CT 仿真中却是无效的.魏英等^[10]针对 CT 图像中由高密度物质造成的条状伪影提出了重投影、线性插值和图像融合的方法进行伪影校正.实验表明该方法对接近圆形的高密度物质引起的条状伪影的校正较为理想,对于接近条形的高密度物质造成的条状伪影校正效果较差.

李建东^[11]提出了一种新的滤波函数用于医学 CT 中由于 X 射线光子缺乏而导致的条状伪影的消除,其将滤波仅用于光子缺乏的 X 射线通道,在信号高的地方不进行滤波,取得了较好的效果. Chen 等^[12]针对医用 CT 中金属植入物引起的条状伪影提出了一种新的伪影抑制方法,算法使用大尺度非局部均值滤波器进行滤波,利用相关信息最大化分割方法对图像中的条状伪影和金属植入物进行分割,最后利用基于弦图的修复技术对条状伪影进行修正,较好地抑制了条状伪影.李印生等^[13]研究了基于自适应方向性滤波和非局部均值修补的 CT 图像金属伪影消除算法,通过自适应方向性前置滤波器对图像进行滤波,并分别采用均值漂移和最大互信息熵分割出图像的金属和伪影成分,然后从原始弦空间数据中去除伪影部分对应的弦图并采用非局部均值修补和线性插值相结合的方法对弦空间数据进行修补,最后进行滤波反投影重建.洪虹^[14]则研究了基于霍夫变换和数学形态学的 CT 图像金属伪影消除算法,以 CT 图像为输入,通过极坐标和笛卡尔坐标系的转换,用形态学过滤器对金属伪影进行滤除.

CT 图像条状伪影的产生原因不同,其校正方法也不相同.本文针对窄角扇束工业 CT 重建的固体火箭发动机 CT 图像中的条状伪影,分析了其产生原因,提出了相应的条状伪影校正算法,并对校正算法的伪影抑制效果进行了评价.

1 窄角扇束工业 CT 的扫描方式

如图 1 所示,窄角扇束工业 CT 采用平移/旋转的扫描方式.

扫描开始时,射线源和探测器以某一平移步长从固体火箭发动机的一侧平移到另一侧,完成一次投影数据的采集.然后,固体火箭发动机绕其旋转中心旋转某一固定角度,射线源和探测器回

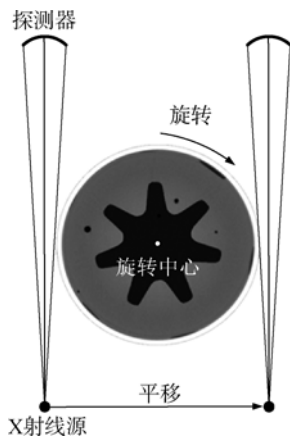


图 1 窄角扇束工业 CT 扫描方式示意图

Fig. 1 Sketch of scanning mode of narrow fan-beam ICT

到起始扫描位置,以相同的平移步长再次对固体火箭发动机进行扫描,直至完成 180° 范围内投影数据的采集为止^[15].

2 条状伪影产生原因

设窄角扇束射线编号从右至左依次为 $1, 2, \dots, N$, 且中间射线编号为 n_r . 由窄角扇束工业 CT 的扫描方式可以看出,扇束射线对固体火箭发动机进行扫描时,存在扫描上的先后顺序,即 1 号射线首先扫描固体火箭发动机,其余射线随着射线源和探测器的平移依次扫描固体火箭发动机,直至 N 号射线扫描完固体火箭发动机,如图 2 所示.

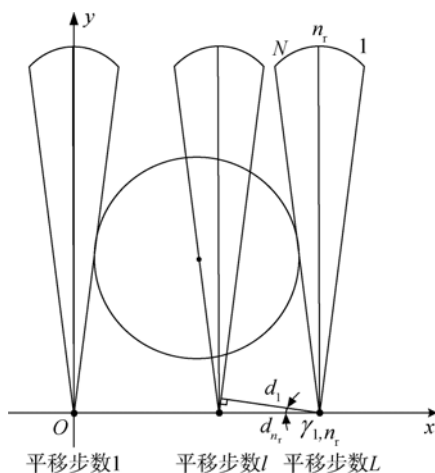


图 2 不等间距平行束投影获取示意图

Fig. 2 Sketch of collection of unequidspaced parallel fan-beam projections

由图 2 可以看出,不同射线平移形成的平行射线组所对应的平移间距是不一样的. 用 d_i ($i=1, 2, \dots, N$) 表示编号为 i 的射线所对应的平移间距,用 γ_{i, n_r} 表示 i 号射线与中间射线 n_r 的夹角,用

$\Delta\gamma$ 表示相邻两条射线间的夹角,则 $\gamma_{i, n_r} = (n_r - i) \Delta\gamma$. 用 d_{n_r} 表示中间射线 n_r 对应的平移间距. 显然

$$d_i = d_{n_r} \cos \gamma_{i, n_r} \quad (1)$$

针对窄角扇束工业 CT 的扫描特点,文献[16]提出了改进的重排算法用于固体火箭发动机窄角扇束 CT 投影的重建. 算法包括读取数据、重排、数据对齐、卷积、射束计算与内插和反投影重建环节. 其中重排过程用于将不等间距的平行束投影数据重排为等间距的平行束投影数据,数据对齐过程则将不同步的等间距平行束投影数据转换为一致同步的等间距平行束投影数据. 然而,重建的固体火箭发动机壳体周围存在着大量的条状伪影,并且随着扫描步长的减小,条状伪影相应减少. 为了避免重排过程造成投影数据的不准确,文献[17]提出了直接卷积反投影算法(DCBP)重建固体火箭发动机的窄角扇束 CT 图像. DCBP 没有重排过程,直接利用不等间距的平行束投影数据进行重建. 重建的固体火箭发动机壳体周围同样存在大量的条状伪影.

本文采用重投影法^[18]分析条状伪影产生的原因. 首先,对重建的固体火箭发动机图像进行处理,去除图像中的条状伪影,然后利用 Matlab 软件中的“radon”命令对处理后的固体火箭发动机 CT 图像进行投影以获得仿真投影数据,最后利用“iradon”命令和滤波反投影算法(FBP)对仿真投影数据进行重建,相关结果如图 3 所示. 有关真实投影数据的重建结果如图 4 所示.

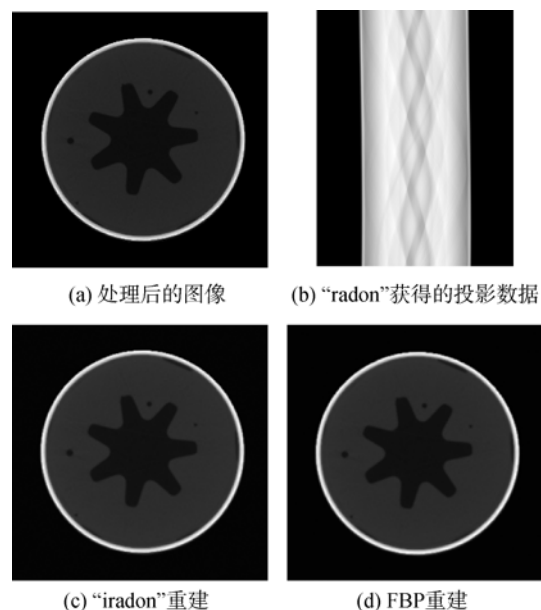


图 3 仿真投影数据重建结果

Fig. 3 Reconstructed results of simulation projections

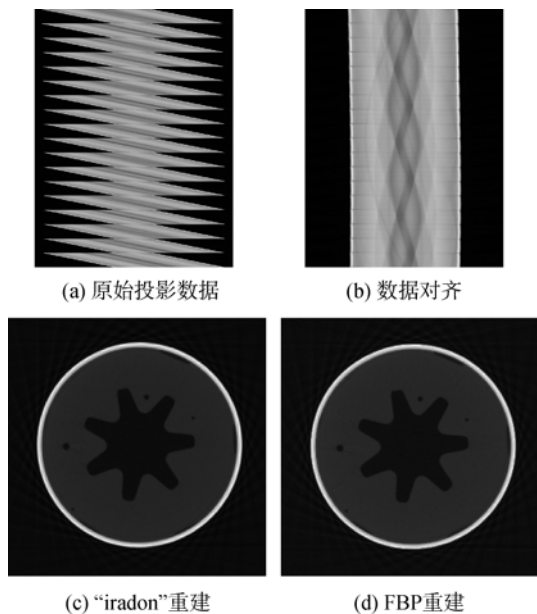


图4 真实投影数据重建结果

Fig. 4 Reconstructed results of true projections

比较固体火箭发动机仿真投影数据和真实投影数据的重建结果(图3和图4),可以发现两者的区别在于真实投影数据经数据对齐后壳体部分的投影数据不具有光滑连续性,而“radon”变换获得的仿真投影数据在壳体部分是光滑连续的.因此,固体火箭发动机CT图像壳体处的条状伪影是由壳体部分投影的非光滑连续性引起的.

根据上述条状伪影的原因分析,下面将进行固体火箭发动机CT图像条状伪影的校正算法研究.

3 条状伪影校正算法

明确了固体火箭发动机CT图像壳体处条状

当 $l < L_1$ 时

$$p_1[m, n, (L_1 - l)d] = \begin{cases} \frac{p(m, n, d_n)}{2} + \frac{p(m, n, 2d_n)}{2} & l_0 \leq 0 \\ (1 - \Delta l)p(m, n, l_0 d_n) + \Delta l p[m, n, (l_0 + 1)d_n] & l_0 > 0 \end{cases} \quad (3)$$

当 $l = L_1$ 时

$$p_1(m, n, ld) = p(m, n, ld_n) \quad (4)$$

当 $l > L_1$ 时

$$p_1(m, n, ld) = \begin{cases} (1 - \Delta l)p(m, n, l_0 d_n) + \Delta l p[m, n, (l_0 + 1)d_n] & l_0 < L \\ \frac{p[m, n, (L - 1)d_n]}{2} + \frac{p(m, n, Ld_n)}{2} & l_0 \geq L \end{cases} \quad (5)$$

3.1.2 数据对齐

数据对齐是为了获得一致同步的投影数据.选取中间 n_r 号射线为基准射线进行数据对齐的处理,则基准射线右边的射线投影数据需要进行

伪影的产生原因,目的就是通过改进现有的窄角扇束工业CT重建算法使得固体火箭发动机壳体处的投影数据具有较好的光滑连续性,从而减少重建CT图像的条状伪影.

记固体火箭发动机的CT投影数据为 $p(m\Delta\phi, n\Delta\gamma, ld_n)$, 简记为 $p(m, n, ld_n)$, 其中 $m = 1, 2, \dots, M$; $n = 1, 2, \dots, N$; $l = 1, 2, \dots, L$. M 表示固体火箭发动机的总旋转次数, $\Delta\phi$ 表示其旋转角度, L 表示射线源和探测器的平移步数.在文献[16]的基础上,提出两种条状伪影校正方法.两种方法均以中间步数 $L_1 = \text{floor}(L/2)$ 的投影数据为基准进行投影数据的重排,其中一种将重排和数据对齐过程分开处理,简称校正算法1;另一种将重排和数据对齐过程合并为一个过程处理,简称校正算法2.下面主要介绍两种校正算法与改进的重排算法的不同之处.

3.1 校正算法1

3.1.1 重排

在文献[16]中,选取平移步数为1的投影数据作为基准进行投影数据的重排.这里选取平移步数为 L_1 的投影数据作为基准进行投影数据的重排.则

$$l^* = l_0 + \Delta l = \begin{cases} L_1 - l/\cos\gamma_{i, n_r} & l < L_1 \\ L_1 + (l - L_1)/\cos\gamma_{i, n_r} & l > L_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中 l_0 是 l^* 的整数部分, Δl 为其小数部分.

对于 n 号窄角扇束射线,将不等间距的平行束投影数据 $p(m, n, ld_n)$ 重排成等间距的平行束投影数据 $p_1(m, n, ld)$, 其计算公式如下:

左移,基准射线左边的射线投影数据需进行右移,由此获得一致同步的投影数据 $p_2(m, n, ld)$. 其值可通过下式计算得到

$$p_2(m, n, ld) = \begin{cases} p_1[m, n, (l - k_1)d] & 0 < l - k_1 \leq L \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中 $k_1 = \text{round}\left[\frac{D \tan \gamma_{i, n_t}}{d}\right]$, round 为向最近的整数取整符号; D 为射线源至发动机旋转中心的垂直距离; d 为射线源和探测器的扫描步长, 与 n_t 号中心射线的平移步长相等, 即 $d = d_{n_t}$.

3.2 校正算法 2

由于重排和数据对齐过程合并处理, 所以

当 $l < L_1$ 时

$$p_2(m, n, (L_1 - l)d) = \begin{cases} \frac{p(m, n, 1d_n)}{2} + \frac{p(m, n, 2d_n)}{2} & l_0 \leq 0 \\ (1 - \Delta l)p(m, n, l_0 d_n) + \Delta l p[m, n, (l_0 + 1)d_n] & l_0 > 0 \end{cases} \quad (8)$$

当 $l \geq L_1$ 时

$$p_2(m, n, ld) = \begin{cases} (1 - \Delta l)p(m, n, l_0 d_n) + \Delta l p[m, n, (l_0 + 1)d_n] & l_0 < L \\ \frac{p[m, n, (L - 1)d_n]}{2} + \frac{p(m, n, Ld_n)}{2} & l_0 \geq L \end{cases} \quad (9)$$

4 实验验证

为了验证所提出的固体火箭发动机 CT 图像条状伪影校正算法的有效性, 采用 450 kV 射线源的窄角扇束工业 CT 对某型固体火箭发动机进行检测, 检测时分别选取 0.5, 1, 2 mm 三种不同的扫描步长. 分别用改进的重排算法、DCBP、校正算法 1 和校正算法 2 对投影数据进行重建. 3 种

$$l^* = l_0 + \Delta l = \begin{cases} L_1 - k_2 - l / \cos \gamma_{i, n_t} & l < L_1 \\ L_1 - k_2 + \frac{(l - L_1)}{\cos \gamma_{i, n_t}} & l \geq L_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中 $k_2 = (D \tan \gamma_{i, n_t}) / d$.

对于 n 号窄角扇束射线, 将不等间距的平行束投影数据 $p(m, n, ld_n)$ 重排且经数据对齐变成一致同步的等间距平行束投影数据 $p_2(m, n, ld)$, 其计算公式如下

不同扫描步长对应的图像重建结果分别如图 5~图 7 所示.

由重建结果可以看出, 随着扫描步长的减小, 采集的投影数据增多, 重建图像的条状伪影相应减少. 校正算法 1 在扫描步长较小时, 重建图像质量较好, 随着扫描步长的增大, 重建图像质量下降较快, 与改进重排算法和 DCBP 的图像重建质量相当. 而校正算法 2 重建的图像质量要优于

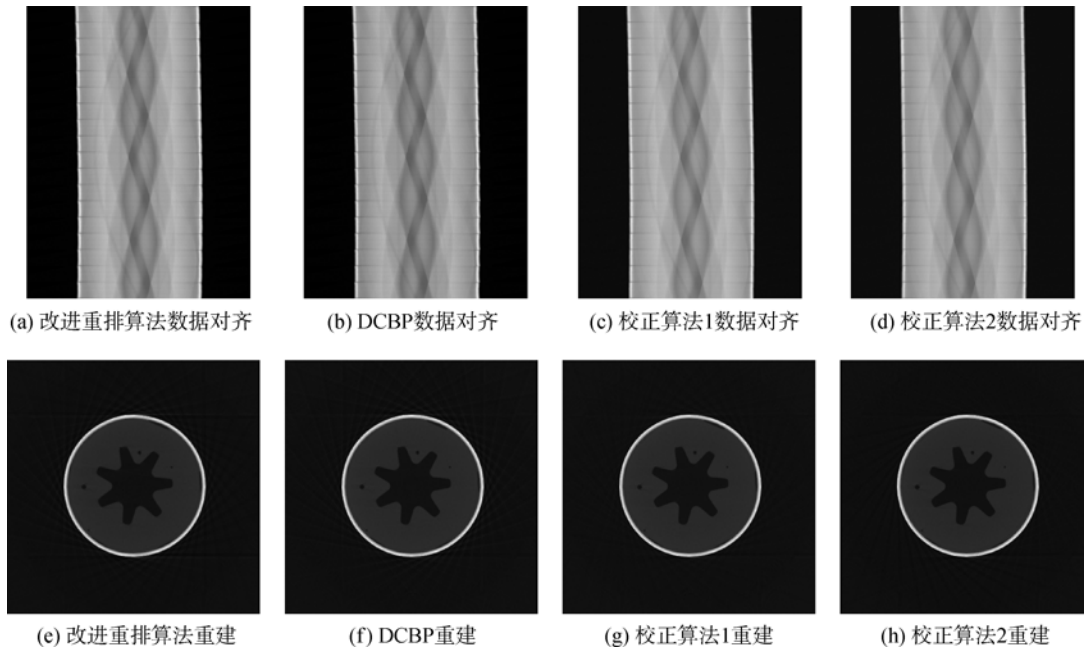
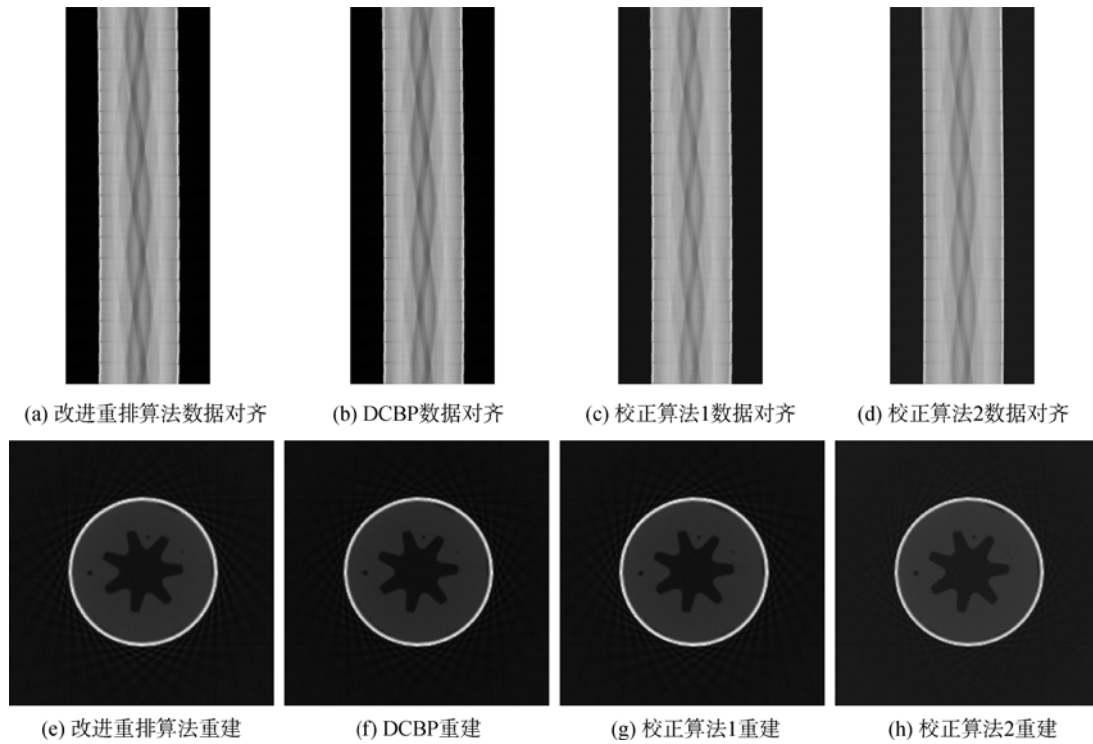
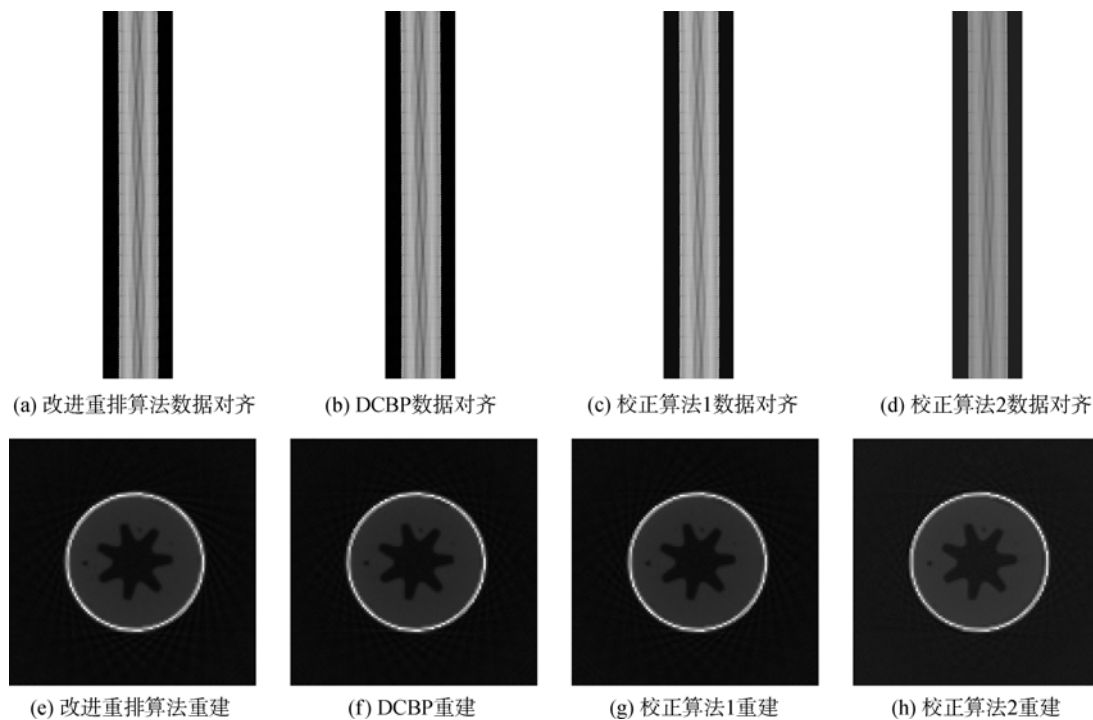


图 5 $d=0.5$ mm 时的重建结果

Fig. 5 Reconstructed results of $d=0.5$ mm

图6 $d=1\text{ mm}$ 时的重建结果Fig. 6 Reconstructed results of $d=1\text{ mm}$ 图7 $d=2\text{ mm}$ 时的重建结果Fig. 7 Reconstructed results of $d=2\text{ mm}$

其他3种算法的重建图像质量.在3种扫描步长的情况下,其重建图像的条状伪影均不明显.这是由于校正算法1的重排和数据对齐过程使用了两次取整运算,而校正算法2将重排和数据对齐过

程合并,仅使用了一次取整运算,从而使得校正算法2对投影数据进行数据对齐处理后,固体火箭发动机壳体部分的投影数据具有较好的光滑连续性,使得重建图像的条状伪影较少.

5 结 论

1) 窄角扇束工业 CT 对固体火箭发动机进行扫描时,由于采用平移/旋转的扫描方式,使得投影数据经重排和数据对齐后不可避免地存在非光滑连续性,导致重建的 CT 图像存在条状伪影。

2) 如果要减少窄角扇束工业 CT 重建的固体火箭发动机 CT 图像中的条状伪影,需要使获得的 CT 投影数据具有较好的光滑连续性。此种情况下,将重排和数据对齐过程合并处理比分开处理能够取得光滑连续性更好的投影数据,进一步减少重建 CT 图像中的条状伪影。

参考文献:

- [1] 卢洪义,朱敏,于光辉,等. 固体火箭发动机三维可视化故障诊断技术[M]. 北京:国防工业出版社,2014.
- [2] 朱敏,于光辉,卢洪义,等. 固体火箭发动机体空间缺陷精确定位方法[J]. 航空动力学报,2013,28(10):2364-2369. ZHU Min, YU Guanghui, LU Hongyi, et al. Defect accurate positioning method of solid rocket motor in volume space[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(10): 2364-2369. (in Chinese)
- [3] 朱敏,卢洪义,从培胜,等. 固体发动机 CT 检测中的一种缺陷识别方法[J]. 航空动力学报,2009,24(1):230-234. ZHU Min, LU Hongyi, CONG Peisheng, et al. A method of defect recognition in solid motor CT testing[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(1): 230-234. (in Chinese)
- [4] 谷建伟,张丽,陈志强,等. 工业 CT 图像的伪影成因和校正方法综述[J]. CT 理论与应用研究,2005,14(3):24-28. GU Jianwei, ZHANG Li, CHEN Zhiqiang, et al. The review of reasons and correction methods for artifacts in ICT images[J]. CT Theory and Applications, 2005, 14(3): 24-28. (in Chinese)
- [5] MOU Xuanqin, TANG Shaojie, YU Hengyong. A beam hardening correction method based on HL consistency[R]. San Diego, US: International Society for Optical Engineering Developments in X Ray Tomography 63181U, 2006.
- [6] 张砚博,汤少杰,牟轩沁. 基于 CT 数据一致性的双多项式射束硬化校正改进[J]. 光子学报,2009,38(8):2131-2134. ZHANG Yanbo, TANG Shaojie, MOU Xuanqin. Improvement of bi-polynomial method for beam hardening correction based on consistency of CT data[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(8): 2131-2134. (in Chinese)
- [7] 余晓镔,李婵娟,陈武凡. 运用混合插值法降低金属伪影[J]. 南方医科大学学报,2009,29(1):29-31. YU Xiaoe, LI Chanjuan, CHEN Wufan. Hybrid interpolation for CT metal artifact reducing[J]. Journal of Southern Medical University, 2009, 29(1): 29-31. (in Chinese)
- [8] 余晓镔. 优化 CT 图像金属伪影消除算法研究[D]. 广州:南方医科大学,2009. YU Xiaoe. Research on CT image metal artifact reduction using optimal hybrid methods[D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2009. (in Chinese)
- [9] Mory C, Auvray V, Zhang B, et al. Removing streak artifacts from ECG-gated reconstructions using deconvolution[J]. Journal of X-Ray Science and Technology, 2014, 22(2): 253-270.
- [10] 魏英,李春云. CT 图像“条状”伪影校正算法研究[J]. 光学技术,2007,33(1):141-143. WEI Ying, LI Chunyun. The research of streak artifact correcting method in CT reconstruction[J]. Optical Technique, 2007, 33(1): 141-143. (in Chinese)
- [11] 李建东. CT 成像的 ART 重建算法和条状伪影的降低[D]. 沈阳:东北大学,2001. LI Jiandong. Algebraic reconstruction technique of CT imaging and streak artifact reduction[D]. Shenyang: Northeastern University, 2001. (in Chinese)
- [12] Chen Y, Li Y S, Guo H, et al. CT metal artifact reduction method based on improved image segmentation and sinogram inpainting[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2012, 2012: 786281. 1-786281. 18.
- [13] 李印生,陈阳,马建华,等. 基于自适应方向性滤波和非局部均值修补的 CT 图像金属伪影消除[J]. 中国生物医学工程学报,2011,30(3):377-381. LI Yinsheng, CHEN Yang, MA Jianhua, et al. Metal artifact reduction in CT based on adaptive steering filter and nonlocal sinogram inpainting[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2011, 30(3): 377-381. (in Chinese)
- [14] 洪虹. CT 中金属伪影的校正研究[D]. 广州:南方医科大学,2013. HONG Hong. Study on metal artifact reduction in computed tomography[D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2013. (in Chinese)
- [15] 陈庆贵,卢洪义,周源,等. 固体火箭发动机缺陷的 ICT 局部检测[J]. 航空动力学报,2015,30(9):2291-2297. CHEN Qinggui, LU Hongyi, ZHOU Yuan, et al. ICT local inspection of solid rocket motor's defects[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(9): 2291-2297. (in Chinese)
- [16] 陈庆贵,刘赵云,卢洪义,等. 基于窄角扇束扫描的固体火箭发动机 CT 图像重建[J]. 固体火箭技术,2014,37(6):877-880. CHEN Qinggui, LIU Zhaoyun, LU Hongyi, et al. CT image reconstruction of solid rocket motor based on narrow fan beam scan[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2014, 37(6): 877-880. (in Chinese)
- [17] 陈庆贵,卢洪义,周红梅,等. 固体火箭发动机窄角扇束 CT 投影直接重建算法[J]. 固体火箭技术,2015,38(4):591-594. CHEN Qinggui, LU Hongyi, ZHOU Hongmei, et al. Direct reconstruction algorithm for narrow fan-beam CT projections of solid rocket motor[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2015, 38(4): 591-594. (in Chinese)
- [18] Nassi M, Brody W R, Medoff B P, et al. Iterative reconstruction-reprojection: an algorithm for limited data cardiac computed tomography[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1982, 29(5): 333-340.

(编辑:陈 越)