

固体火箭发动机缺陷的 ICT 局部检测

陈庆贵¹, 卢洪义¹, 周源², 李慎³, 李朋¹, 于光辉⁴

(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 七系, 山东 烟台 264001;

3. 中国人民解放军 91206 部队, 山东 青岛 266108;

4. 海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘 要: 为了实现对固体火箭发动机缺陷的局部检测, 提出了窄角扇束工业计算机断层扫描成像 (ICT) 检测固体火箭发动机缺陷的局部检测方案. 采用平移/旋转扫描方式和只旋转扫描方式对固体火箭发动机缺陷进行局部检测. 为了验证局部检测方案的有效性, 利用窄角扇束 ICT 对某型固体火箭发动机进行局部检测, 并利用卷积反投影算法和小波变换算法进行局部重建. 结果表明: 平移/旋转扫描方式适合窄角扇束 ICT 对固体火箭发动机缺陷进行局部检测, 只旋转扫描方式不适合局部检测. 由于利用局部缺陷区域外的投影数据, 卷积反投影算法较小波变换算法的局部重建质量高. 这对于提高固体火箭发动机缺陷的检测效率, 降低检测成本具有重要意义.

关 键 词: 固体火箭发动机; 缺陷; 窄角扇束 ICT; 局部检测; 卷积反投影; 小波变换

中图分类号: V435

文献标志码: A

ICT local inspection of solid rocket motor's defects

CHEN Qing-gui¹, LU Hong-yi¹, ZHOU Yuan², LI Shen³,

LI Peng¹, YU Guang-hui⁴

(1. Department of Airborne Vehicle Engineering,

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

2. No. 7 Department, Naval Aeronautical and Astronautical University,

Yantai Shandong 264001, China;

3. Unit 91206, the Chinese People's Liberation Army, Qingdao Shandong 266108, China;

4. Qingdao Branch, Naval Aeronautical and Astronautical University,

Qingdao Shandong 266041, China)

Abstract: To inspect solid rocket motor's defects locally, local inspection scheme of solid rocket motor's defects was proposed for narrow fan-beam industrial computed tomography (ICT). Translation/rotation scan mode and rotation only scan mode were used to inspect solid rocket motor's defects locally. To demonstrate the effectiveness of local inspection scheme, narrow fan-beam ICT was used to inspect one solid rocket motor locally. Convolution backprojection algorithm and wavelet transform algorithm were applied to reconstruct ICT images locally. Results show that translation/rotation scan mode is effective for narrow fan-beam ICT to inspect solid rocket motor's defects locally, rotation only scan mode is not effective. For using projections outside the local defect area, the reconstructed image quality

收稿日期: 2014-07-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51005242)

作者简介: 陈庆贵 (1987-), 男, 山东莒南人, 博士生, 主要从事发动机测试理论与技术研究.

of convolution backprojection algorithm is better than that of wavelet transform algorithm. It is of great significance for improving the inspection efficiency of solid rocket motor's defects and for reducing the inspection cost.

Key words: solid rocket motor; defect; narrow fan-beam ICT; local inspection; convolution backprojection; wavelet transform

固体火箭发动机(下文简称发动机)在生产和贮存期间由于受温湿度、冲击等因素的影响,导致内部装药会产生裂纹、气孔,药柱与壳体黏接面产生脱黏等缺陷,严重影响发动机的可靠使用^[1-3]. 目前,用于发动机缺陷检测的方法包括超声波法、内窥镜法、激光全息法、射线照相法和 ICT 法^[4-6]. 与其他方法相比,ICT 可实现固体火箭发动机缺陷的定量判断,根据检测结果给出缺陷的位置、大小及其性质,但检测成本较高^[4].

为了提高发动机的缺陷检测效率,准确判断缺陷的类别和大小,并不需要对发动机整个断面进行精细扫描,只需对缺陷区域进行局部检测. 对于发动机缺陷局部检测的研究,文献[7]利用滤波反投影算法对修正后的局部投影数据进行重建,获得了较好的重建效果. 文献[8]研究了基于小波的多分辨率局部重建算法,对 ICT 数值仿真获得的发动机局部投影数据进行了局部重建. 文献[9]同样研究了基于小波变换的局部重建算法,对广角扇束 CT 扫描获得的发动机投影数据进行局部重建.

结合发动机检测的实际情况,本文提出了窄角扇束 ICT 局部检测发动机缺陷的检测方案并进行实验验证,同时还研究了卷积反投影算法和小波变换算法的局部重建效果.

1 缺陷局部检测方案

在对发动机进行局部检测前,需要先判断发动机是否存在缺陷,这就需要对发动机的检测截面进行全断面扫描. 首先采用大步长对发动机进行全断面扫描和 ICT 成像,判断发动机是否存在缺陷. 如果不能确定发动机是否存在缺陷,则缩小步长再次对发动机截面进行扫描,直至能够确定发动机是否存在缺陷. 如果存在缺陷,则确定缺陷的位置,然后进行小步长局部细扫描.

窄角扇束 ICT 对发动机进行局部扫描时需要考虑以下两种情况:一是局部缺陷区域中心与发动机旋转中心不重合,简称偏心方式;二是局部缺陷区域中心与发动机旋转中心重合,简称同心

方式.

如果局部缺陷区域属于偏心方式,采用平移/旋转扫描方式. 射线源和探测器组首先移动到局部缺陷区域的一侧,使得最外侧的射线与局部缺陷区域的边缘相切,然后小步长平移扫描至局部缺陷区域的另一侧,完成一次局部投影数据的采集;接着,发动机绕其旋转中心转过某一固定角度,射线源和探测器组回到下一起始扫描位置,以相同步长再次对局部缺陷区域进行扫描,直至完成 180° 范围内投影数据的采集为止,如图 1 所示. 由于局部缺陷区域随着发动机的旋转而发生位置的变化,所以射线源和探测器组的起始扫描位置和终止扫描位置也随着发动机的旋转而发生

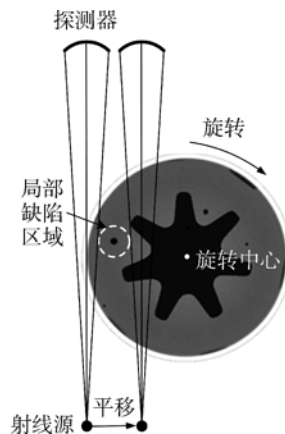


图1 偏心方式下局部缺陷区域平移/旋转扫描示意图

Fig. 1 Sketch of translation/rotation scan of local defect area for eccentric mode

如果局部缺陷区域属于同心方式,扫描方案可以分为两种情况:一是和偏心方式的扫描方案一样,采用平移/旋转扫描方式,不同于偏心扫描的是发动机每旋转一次,射线源和探测器组的起始扫描位置和终止扫描位置都相同,如图 2 所示. 二是如果射线源和探测器组形成的射线角能够覆盖局部缺陷区域,考虑射线源和探测器组固定不动,发动机旋转的扫描方式,如图 3 所示.

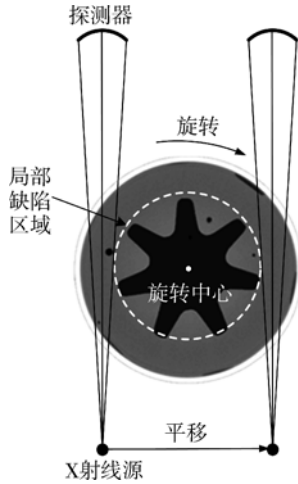


图2 同心方式下局部缺陷区域平移/旋转扫描示意图

Fig. 2 Sketch of translation/rotation scan of local defect area for concentric mode

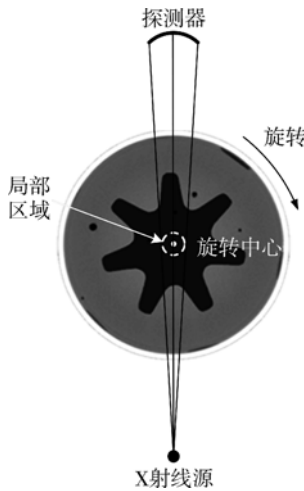


图3 同心局部缺陷区域只旋转扫描示意图

Fig. 3 Sketch of rotation only scan of concentric local defect area

2 局部投影数据的获取

2.1 偏心方式

偏心方式下,发动机每旋转一次,起始扫描位置和终止扫描位置都要发生变化.这里计算窄角扇束中心射线(射线源与探测器组中间探测器之间的连线) S_0D_0 的起始扫描位置和终止扫描位置,如图4所示.

选取半径为 r 的圆形局部缺陷区域,记缺陷区域圆心的像素坐标为 (i_c, j_c) ,发动机旋转中心的像素坐标为 (i_o, j_o) . 设单位像素长度为 d , D 表示射线源至发动机旋转中心的垂直距离, γ_0 表示窄角扇束射线角的一半, β 表示发动机每次转

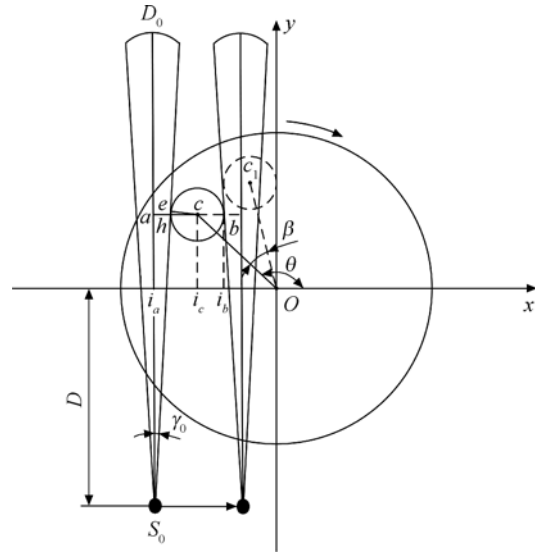


图4 偏心方式下起始和终止扫描位置示意图

Fig. 4 Sketch of initial and final scan positions for eccentric mode

过的角度.

则缺陷区域中心距发动机旋转中心的距离为

$$l_{Oc} = \sqrt{(i_c - i_o)^2 + (j_c - j_o)^2} d \quad (1)$$

Oc 与 x 轴正方向的夹角为

$$\theta = \begin{cases} \arctan\left(\frac{j_c - j_o}{i_c - i_o}\right) & i_c > i_o \\ \arctan\left(\frac{j_c - j_o}{i_c - i_o}\right) + \pi & i_c < i_o \end{cases} \quad (2)$$

中心射线 S_0D_0 的起始扫描位置 i_a 可通过下式计算得到:

$$i_a = i_c - l_{ac}/d \quad (3)$$

$$l_{ac} = l_{ah} + l_{ch} =$$

$$[D + (j_c - j_o)d] \tan \gamma_0 + r/\cos \gamma_0 \quad (4)$$

中心射线 S_0D_0 的终止扫描位置 i_b 为

$$i_b = i_c + l_{bc}/d \quad (5)$$

式中 $l_{bc} = l_{ac}$.

当发动机绕其旋转中心顺时针转过角度 β 后,设缺陷区域的圆心由位置 c 变为 c_1 ,此时 c_1 的像素坐标为

$$\begin{aligned} i_{c_1} &= i_o + l_{Oc_1} \cos(\theta - \beta)/d = \\ & i_o + l_{Oc} \cos(\theta - \beta)/d \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} j_{c_1} &= j_o + l_{Oc_1} \sin(\theta - \beta)/d = \\ & j_o + l_{Oc} \sin(\theta - \beta)/d \end{aligned} \quad (7)$$

求得缺陷区域圆心新的像素坐标后,便可按照式(3)和式(5)计算中心射线 S_0D_0 新的起始扫描位置和终止扫描位置.

2.2 同心方式

同心方式下,采用平移/旋转扫描方式时中心

射线 $S_0 D_0$ 起始扫描位置和终止扫描位置的确定,按照偏心方式下的式(3)和式(5)计算。

对于射线源和探测器组固定不动,发动机旋转的扫描方式,中心射线 $S_0 D_0$ 经过发动机旋转中心,发动机绕其旋转中心转过 360° 便可获得局部区域的投影数据。此种情况下,可扫描的缺陷区域的最大半径为 $D \sin \gamma_0$ 。

3 局部重建算法

通过局部缺陷区域的扫描方案可以发现,平移/旋转扫描方式在获得局部缺陷区域内投影数据的同时,还获得了局部缺陷区域外的部分投影数据;当局部缺陷区域的半径小于 $D \sin \gamma_0$ 时,只旋转扫描方式也获得了局部缺陷区域外的部分投

影数据。

为了充分利用窄角扇束 ICT 扫描获得的投影数据,在对局部缺陷区域进行重建时,除了利用局部缺陷区域内的投影数据外,还利用局部缺陷区域外的投影数据。这与一般的局部重建只利用局部区域内的投影数据有所区别。这里考虑卷积反投影重建算法^[10-13]和基于小波变换^[14-16]的局部重建算法。

结合窄角扇束 ICT 的扫描特点,利用改进的重排算法对局部投影数据进行卷积反投影重建,其主要包括读取数据、重排、数据对齐、卷积、射束计算与内插和反投影重建环节^[17]。基于小波变换的局部重建算法则是将小波变换与改进的重排算法相结合进行局部重建,其重建流程图如图5所示。

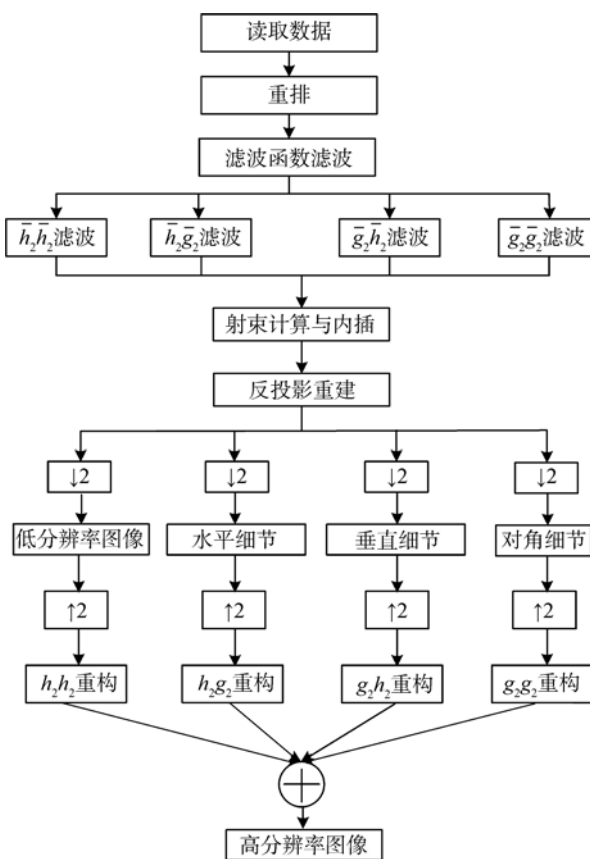


图5 窄角扇束 ICT 投影小波变换局部重建流程图

Fig. 5 Flowchart of wavelet transform local reconstruction of narrow fan-beam ICT projections

图5中 $\bar{h}_2$ 表示尺度分解滤波器, $\bar{g}_2$ 表示小波分解滤波器, h_2 表示尺度重构滤波器, g_2 表示小波重构滤波器。 $\downarrow 2$ 表示2倍降采样, $\uparrow 2$ 表示2倍升采样。

4 实验验证

为了验证提出的发动机缺陷局部检测方案的

有效性,采用450kV射线源的窄角扇束 ICT 对某型发动机进行步长为2mm的大步长全断面扫描,对获得的投影数据进行重建得到发动机稀疏投影重建图像,如图6所示。从图6中可以发现发动机存在气孔和脱黏等缺陷,选定图中偏心的局部缺陷区域1和2及同心的局部缺陷区域3分别进行局部细扫描。

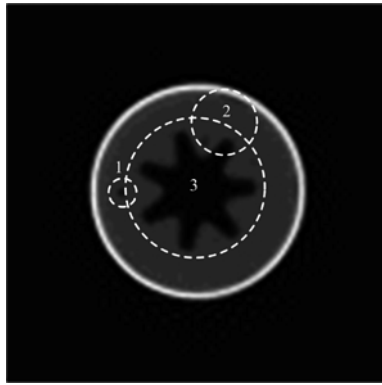


图6 发动机稀疏投影重建图像

Fig. 6 Reconstructed image of sparse projections of solid rocket motor

对图6中的局部缺陷区域1,2和3均进行0.5 mm步长的局部细扫描,对于局部缺陷区域1和2采用平移/旋转扫描方式进行扫描,对于局部缺陷区域3,选取其半径为 $D\sin\gamma_0$,对其分别进行平移/旋转扫描方式和只旋转扫描方式扫描.用卷积反投影算法和小波变换算法分别对获得的投影数据进行局部重建,重建时除了利用局部缺陷区域内的投影数据外,还用到获得的局部缺陷区域外的投影数据.图像重建结果如图7~图10所示.

由图像重建结果可以看出,窄角扇束 ICT 采用平移/旋转扫描方式对发动机缺陷进行局部检测是有效的,只旋转扫描方式由于受 ICT 机械扫

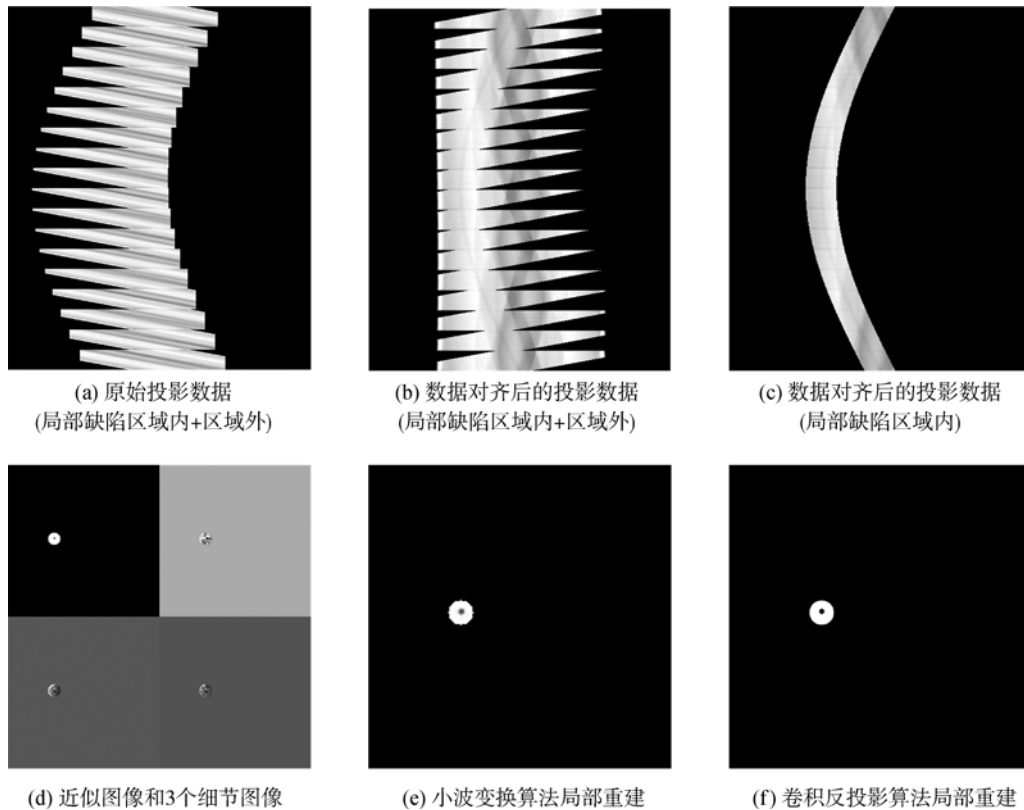


图7 局部缺陷区域1局部重建结果

Fig. 7 Local reconstructed results of local defect area 1

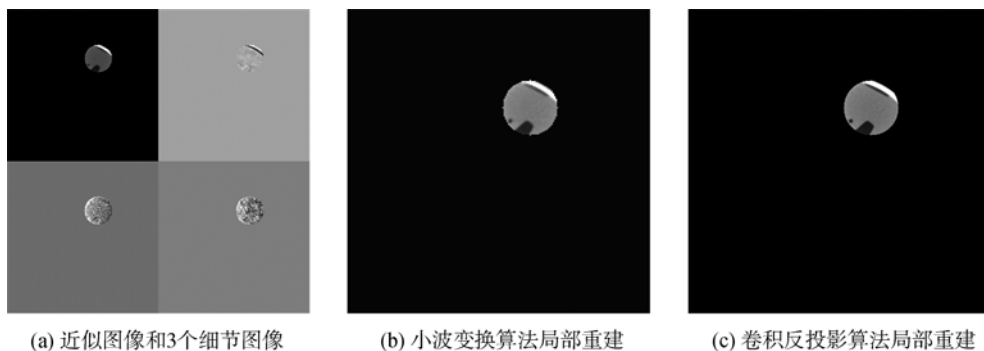


图8 局部缺陷区域2局部重建结果

Fig. 8 Local reconstructed results of local defect area 2



图9 局部缺陷区域3平移/旋转扫描局部重建结果

Fig. 9 Local reconstructed results of local defect area 3 for translation/rotation scan mode

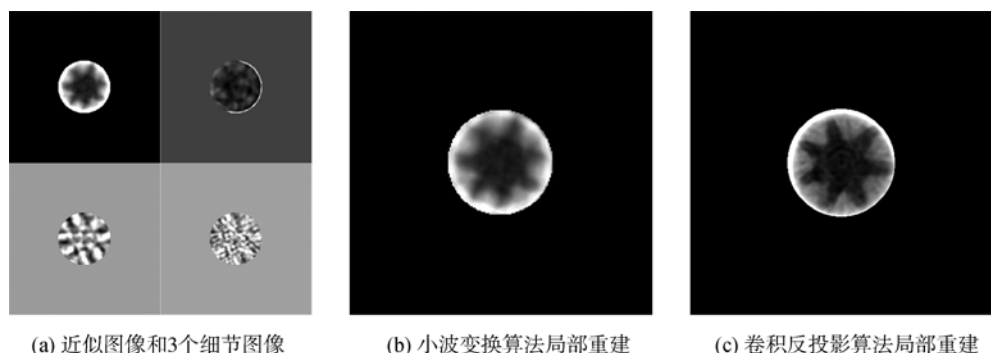


图10 局部缺陷区域3只旋转扫描局部重建结果

Fig. 10 Local reconstructed results of local defect area 3 for rotation only scan mode

描系统^[18]的限制,采集的投影数据量少从而造成图像重建质量较差.在对投影数据进行局部重建时,由于利用了局部缺陷区域外的投影数据,卷积反投影算法的局部重建效果优于小波变换算法的局部重建效果.

5 结 论

1) 窄角扇束 ICT 可以采用平移/旋转扫描方式对发动机缺陷进行局部检测,此时需要确定射线源和探测器组的起始扫描位置和终止扫描位置.

2) 由于受窄角扇束 ICT 机械扫描系统的限制,只旋转扫描方式对发动机同心缺陷的局部检测效果不理想.若要改善图像重建质量,需要改进机械扫描系统,增加投影数据量.

3) 对窄角扇束 ICT 获得的局部投影数据进行重建时,由于利用了局部缺陷区域外的投影数据,卷积反投影算法的局部重建结果优于小波变换算法的局部重建结果.

参考文献:

[1] 卢洪义,杨兴根,孙有田.固体火箭发动机内部缺陷高分辨

率检测[J].推进技术,2003,24(1):90-92.

LU Hongyi, YANG Xinggen, SUN Youtian. High resolution inspecting investigation for inner defect of SRM[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(1): 90-92. (in Chinese)

[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] 李涛,张乐,赵锴,等.固体火箭发动机机缺陷分析及其无损检测技术[J].无损检测,2006,28(10):541-544.

LI Tao, ZHANG Le, ZHAO Kai, et al. Analysis and non-destructive testing of defects for solid rocket motor[J]. Nondestructive Testing, 2006, 28(10): 541-544. (in Chinese)

[5] 艾春安,桑元,徐志高,等.基于 X 射线胶片的固体火箭发动机断面图像重建[J].无损检测,2011,33(3):1-4.

AI Chun'an, SANG Yuan, XU Zhigao, et al. Solid rocket motor sectional view reconstruction from X-ray films[J].

- Nondestructive Testing, 2011, 33(3): 1-4. (in Chinese)
- [6] 唐庆明, 张明. 固体火箭发动机的装药缺陷及检测方法[J]. 飞航导弹, 2006(7): 52-54.
- [7] 卢洪义, 杨兴根, 程卫平. 小张角扇形射线束 CT 检测固体火箭发动机局部缺陷[J]. 推进技术, 2003, 24(3): 251-253.
- LU Hongyi, YANG Xinggen, CHENG Weiping. Local tomography inspecting investigation for inner crack of SRM[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(3): 251-253. (in Chinese)
- [8] 王飞. 基于 ICT 的固体火箭发动机无损检测及成像技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [9] 张卫贞. 固体火箭发动机 ICT 局部重建算法研究[D]. 太原: 中北大学, 2009.
- ZHANG Weizhen. Research on local tomography algorithm of solid rocket engine based on ICT[D]. Taiyuan: North University of China, 2009. (in Chinese)
- [10] 马有为. 基于小波的图像重建扇束卷积反投影算法[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [11] 叶海霞, 王珏, 瞿中. 工业 CT 窄角扇束卷积反投影图像重建[J]. 微机发展, 2003, 13(9): 11-12.
- YE Haixia, WANG Jue, QU Zhong. Image reconstruction of ICT in convolution backprojection algorithm with narrow fan-beam scan mode[J]. Microcomputer Development, 2003, 13(9): 11-12. (in Chinese)
- [12] Besson G. CT image reconstruction from fan-parallel data[J]. Medical Physics, 1999, 26(3): 415-426.
- [13] Dennerlein F, Noo F, Hornegger J, et al. Fan-beam filtered-backprojection reconstruction without backprojection weight[J]. Physics in Medicine and Biology, 2007, 52(11): 3227-3240.
- [14] 薛少峰. 基于小波变换的 CT 局部重建算法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2004.
- XUE Shaofeng. The research of wavelet-based local reconstruction algorithm[D]. Shenyang: Northeastern University, 2004. (in Chinese)
- [15] 刘杰, 李政, 康克军, 等. 小波变换用于 CT 图像重建及处理研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(2): 80-83.
- LIU Jie, LI Zheng, KANG Kejun, et al. Study on CT image reconstruction and processing using wavelets[J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(2): 80-83. (in Chinese)
- [16] Farrokh R F, Ray L, Carlos A B, et al. Wavelet-based multiresolution local tomography[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(10): 1412-1430.
- [17] 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)
- [18] 杨兴根, 陈宇杰. 固体火箭发动机专用 ICT 机械扫描系统[J]. 推进技术, 1999, 20(6): 106-108.
- YANG Xinggen, CHEN Yujie. ICT scan system for solid rocket motors[J]. Journal of Propulsion Technology, 1999, 20(6): 106-108. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)