

小张角扇形射线束 CT 检测固体发动机局部缺陷*

卢洪义¹, 杨兴根¹, 程卫平²

(1. 海军航空工程学院 机械工程系, 山东 烟台 264001; 2. 海军驻航星厂军代表室, 北京 100030)

摘 要: 针对小张角扇形射线束 CT 的特点及提高固体火箭发动机缺陷检测效率, 本文在滤波反投影 (FBP) 算法的基础上, 提出了局部区域的图像重建方法, 采用感兴趣的局部区域 (ROI) 的采样数据, 实现了固体火箭发动机局部图像重建。与整体图像重建算法一样, FBP 局部重建的图像清晰, 缺陷分辨率高, 重建速度快, 具有很好的应用价值。

关键词: 固体推进剂火箭发动机; 滤波; 投影; 数据取样; 图像

中图分类号: V435 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2003) 03-0251-03

Local tomography inspecting investigation for inner crack of SRM

LU Hong-yi¹, YANG Xing-gen¹, CHENG Wei-ping²

(1. Dept. of Mechanical Engineering, Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China;

2. Naval Dept. Representatives Office in Hangxing Factory, Beijing 100030, China)

Abstract: The FBP local algorithm on the base FBP was presented for the small fan X-ray CT so as to improve the testing efficiency for the fault of SRM, which was used to implement local tomography by data of region of interest (ROI) of SRM. It is the same as whole image reconstruction that the image of local tomography is sharpen and has high special resolution for crack of SRM. It was suggested that the FBP local tomography algorithm should be widely used.

Key words: Solid propellant rocket engine; Filtering; Projection; Data sampling; Image

1 引 言

小张角扇形射线束 CT, 具有结构简单、图像重建质量高、成本低的优点, 但由于需要射线源和探测器做平移扫描运动, 因此其图像重建速度受到扫描运动的制约。在实际检测时常常对需要进行无损检测物体的某些区域感兴趣, 如, 固体火箭发动机的绝热层、头部及星孔装药的星角部位, 对这些关键部位进行局部精细扫描, 不仅能够提高重建图像的质量, 而且能够提高检测的速度, 这正是小张角扇形射线束 CT 的一个重要功能。目前工业和医用 CT 中常用的图像重建算法主要是滤波反投影算法 (FBP), 需要完整的投影数据。众所周知, Randon 反变换不具有局部重建的性质, 因而 FBP 算法不适宜局部图像重建。关于局部重建算法已有不少的文章发表, 主要有两点: 一是代数局部图像重建法; 二是小波局部图像重建算

法。这两种算法在实际 CT 设备很少应用。FBP 算法是目前 CT 机普遍采用的图像算法, 计算量少、图像质量高, 因此本文主要讨论结合 FBP 算法给出具有实际应用价值、且能够应用到固体火箭发动机局部缺陷检测的局部图像算法。

2 FBP 局部图像重建法的数学描述^[1]

局部图像重建算法是在完整的图像数据中重建局部图像, 避开 Randon 反变换不具有局部重建的性质。有以下两点假设: (1) 通过局部区域扫描获得局部方向的投影值; (2) 局部区域以外的投影值为零。

图 1 中, 要重建的目标放在一个直角坐标网格中, X 射线只是平行移动扫过被测物体的感兴趣区域 (ROI)。记被测物体的密度函数为 $f(x, y)$, 则射线的投影值 $g(p)$ 为

* 收稿日期: 2002-05-13; 修订日期: 2002-08-15。

作者简介: 卢洪义 (1965—), 男, 博士生, 副教授, 研究领域为发动机测试、无损检测。

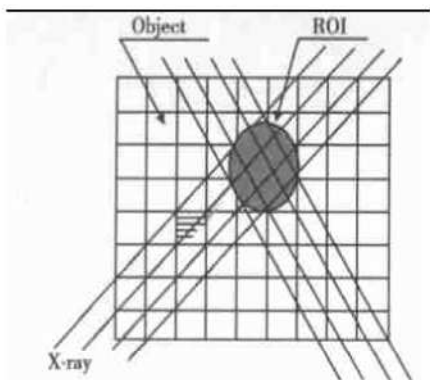


Fig. 1 Local X-ray

$$g(p) = \int_p f(x, y) dp \quad (1)$$

对式(1)取傅氏变换, 得到投影的频域表示

$$G(q, \theta) = \int_{(s, \theta)} g(p, \theta) \exp[-j2\pi qp] dp = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \exp[-j2\pi q(x \cos \theta + y \sin \theta)] dx dy \quad (2)$$

式中 q 为空间频率。对式(2)进行傅氏反变换, 根据投影切片定理, 得到图像的重建公式:

$$f(x, y) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^{+\infty} G(q, \theta) \exp[j2\pi q(x \cos \theta + y \sin \theta)] |q| dq d\theta \quad (3)$$

对式(3)中关于频率 q 的积分项转化为对投影值进行滤波修正运算, 从而得到卷积反投影重建公式

$$f(x, y) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^{+\infty} g(p, \theta) h(p' - p) dp d\theta \quad (4)$$

式(4)中采用的 $h(p' - p)$ 为美国数学家 Shepp L A 和 Logan B F 建立的 S-L 滤波函数。其离散表达式为

$$h(na) = -2/a^2 \pi^2 (4n^2 - 1) \quad n = 0, \pm 1, \dots \quad (5)$$

式中 a 为采样步长。所谓局部重建是指利用通过局部区域的 X 射线的投影值, 重建出局部的断层图像。所以式(4)做以下变换:

$$f(x, y) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^{+\infty} g(p, \theta) h(p' - p) dp d\theta = \int_0^\pi \left(\int_{x_a}^{x_b} g(p, \theta) h(p' - p) d\theta + \int_{x_b}^{x_a} g(p, \theta) h(p' - p) d\theta + \int_{x_b}^{x_b} g(p, \theta) h(p' - p) d\theta \right) \quad (6)$$

式中 x_a, x_b 是图 3 中与局部区域相切的射线位置。

根据假设, 在局部区域以外, 投影值 $g(p, \theta) = 0$, 所以式(6)简化为下列重建公式:

$$f(x, y) = \int_0^\pi \int_{x_a}^{x_b} g(p, \theta) h(p' - p) dp d\theta \quad (7)$$

式(7)为滤波反投影局部重建公式。

为了避免局部重建的盲目性, 准确发现固体火箭发动机内部缺陷, 提高检测效率, 检测时首先对发动机进行稀疏采样, 全断面整体图像重建。然后选取要进行局部图像重建的区域。图 2 是采样率为局部扫描采样率的 1/6 时, 按照整体重建公式(4)重建的完整发动机 CT 图像, 并根据该稀疏采样重建的整体图像确定(1), (2), (3)局部重建区域。

3 局部重建

从稀疏采样重建的图像中可以看到发动机内部区域(1)中有一个缩孔, 因此选择该区进行局部重建。并选择发动机壳体与装药之间的脱粘层作为局部扫描区域, 如图 2 中的区域(2), (3)所示。

局部扫描范围的确定: (1) 确定局部扫描范围应确定局部区域的扫描半径; (2) 确定局部区域扫描中心与 x 轴的夹角; (3) 确定局部区域扫描中心到坐标轴的距离。

3.1 局部区域参数的确定

局部区域参数的关系如图 3 所示。 $X_r O Y_r$ 为投影旋转坐标, 与 XOY 坐标的夹角为 θ ; 局部区域的中心与坐标原点的连线 OO' 的长度为 R , 与 X 轴的夹角为 Φ 。局部区域的半径为 r , 扫描范围为 D 。

3.2 局部采样方案

在局部区域以外不进行采样, 只是快速移动扫描电机至局部区域。在到达局部区域后, 扫描电机移动步长变为前面稀疏采样的 1/6, 采样数据是稀疏采样的 6 倍, 以获得局部区域的大量投影数据。

扫描电机移动距离按式(8), (9)确定。

自原点 O' 到 a 点的距离为 $d1$, 到 b 点的距离为 $d2$, 则有

$$d1 = R \cos(\Phi - \theta) - r \quad (8)$$

$$d2 = R \cos(\Phi - \theta) + r \quad (9)$$

3.3 局部重建^[2,3]

根据图 2 的局部区域 3, 确定区域的坐标参数 (R_3, r_3, Φ_3) 后进行扫描采样, 按照局部重建公式(7)得到局部重建图像。如图 4 所示。局部重建公式(7)由于忽略了局部区域外的投影, 重建的局部区域图像并不理想。为此应对局部区域的投影值进行修正。

4 局部区域图像重建算法的改进

为了得到清晰的重建图像, 对局部投影值进行修正, 使得对局部区域的投影值造成的影响减少到最

低。修正的投影值 $g'(p)$ 为:

$$g'(p) = g(p) \Phi(R, r, \theta) \quad (10)$$

其中 $\Phi(R, r, \theta)$ 为修正函数。

根据式(7)和式(10), 对图 2 所示的局部区域 1, 2, 3 进行局部区域图像重建, 为了更好的观察局部区

域的重建图像, 在局部图像重建的同时, 对局部区域图像图进行放大重建。如图 5~7 所示。可以看到局部区域的缩孔、发动机壳体绝热层的脱粘都清晰可辨, 局部重建的图像达到了理想的效果。

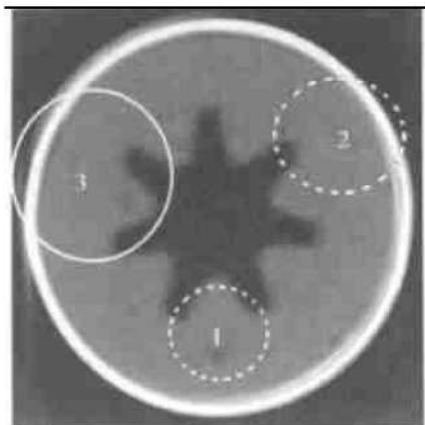


Fig. 2 Whole image

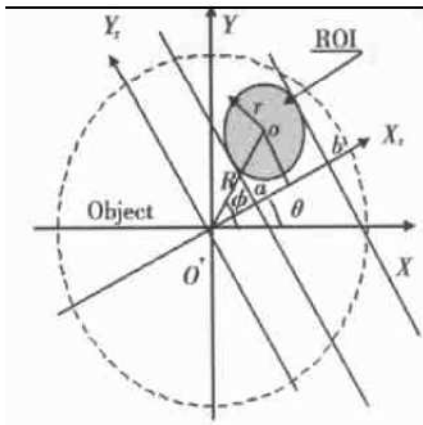


Fig. 3 Local parameters

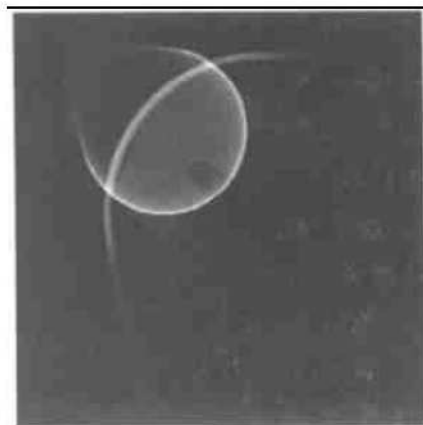


Fig. 4 Local tomography

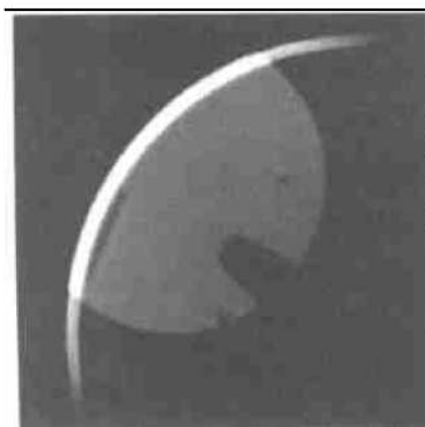


Fig. 5 Local tomography (area 1)

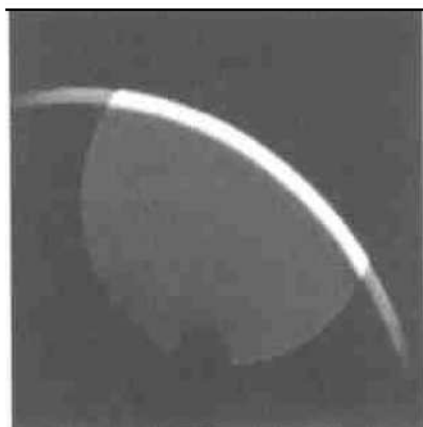


Fig. 6 Local tomography (area 2)

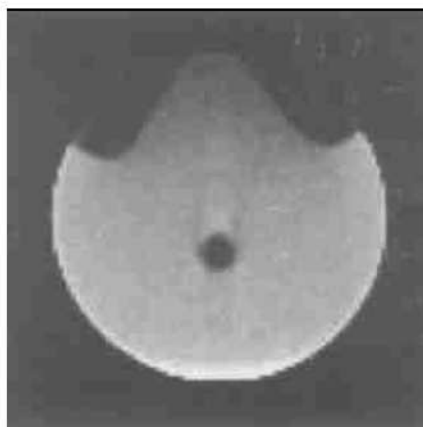


Fig. 7 Local tomography (area 3)

5 结 论

(1) 由于图像重建都是实时在线进行的, 因此图像重建时间主要取决于机械扫描时间。如果局部区域只有整个区域的 10%, 则重建时间不会超过整体重建时间的五分之一。

(2) 实际检测时常遇到形状复杂或者体积很大而无法进行全部扫描的情况, 如大型固体火箭发动机, 其扫描范围很大, 进行全部完整断面检测需耗费很长的时间。局部图像重建可以通过对局部感兴趣区增加采样点数, 提高分辨率和工作效率。

(3) 对于定型 CT 设备, 其扫描范围是一定的。当遇到被检物体的直径超过扫描范围时, 则不能实现

被检物体的整体扫描或 X 射线不能穿透被检物体的有关部位, 投影数据不完全, 这时可对射线穿过的区域进行局部图像重建, 因而同样具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 张贤达, 保 铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 153~ 158.
- [2] Kenneth R Castleman. Digital image processing[M]. USA: Prentice Hall, 1999: 563~ 567.
- [3] Adel Faridani, Erik L Ritman, Kennan Smith T. Local tomography[J]. Siam. J. Appl. Math., 1992, 52: 459~ 484.

(编辑: 梅 瑛)