

基于圆形感兴趣区域的 CT 图像快速重建

甄 妮, 王明泉, 侯慧玲, 许 娜, 郝 敏

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘要: 针对计算机断层成像技术(CT)中的全局重建算法用时长且效率低的问题, 提出先对工件进行低分辨率的快速解析法重建, 再将感兴趣区域(ROI)可视化, 最后采用代数重建法(ART)对ROI进行精细高分辨率算法重建。对固体火箭发动机进行重建的结果表明, 该方法相对全局ART重建算法来说, 能在保持同等分辨率的情况下节省大量时间, 有利于工程实践。

关键词: 感兴趣区域; 图像重建; 迭代法; 固体火箭发动机

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2018)05-0050-03

The Rapid Reconstruction of Computed Tomography Image Based on the Circle Region of Interest

ZHEN Ni, WANG Mingquan, HOU Huiling, XU Na, HAO Min

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement of Ministry of Education,
North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: According to the global reconstruction algorithm of CT will take long time and be of low efficiency, this paper proposes the method of rapid and low resolution ratio analytic reconstruction for artifact firstly, then of visually selecting the region of interest, and finally using the ART algorithm to rebuild the ROI for high resolution. The experimental result for solid rocket engine shows that the algorithm saves a lot of time compared with global ART reconstruction algorithm in the case of the same resolution and the algorithm is beneficial to engineering practice.

Key words: region of interest; image reconstruction; iteration; solid rocket engine

计算机断层成像技术(CT)的基本原理是: 对物体进行不同角度的射线投影, 使用探测器接收携带物体内部结构信息的射线强度信息, 再通过特定的重建算法重建出物体的内部结构^[1]。CT 重建算法目前主要有解析法和迭代法两种^[2]。解析法相对于迭代法, 计算量小, 重建速度快, 便于硬件实现, 但其对投影数据的完整性、噪声含量、射线源的扫描轨迹以及射线源锥角大小的要求较高。CT 技术现已广泛应用于工业无损检测中, 在实际工业检测时, 检测人员有时仅对工件的一小部分感兴趣, 但因无法确

定感兴趣区域(ROI)的具体位置与大小, 所以只能对整个工件进行全局重建, 这样不仅耗时长且效率低^[3]。

固体火箭发动机的构造复杂, 体积庞大, 制造成本昂贵, 因此不能通过直接点火发射进行试验, 而需要通过合适的手段对其进行无损检测^[4]。针对上述问题, 笔者提出了一种对固体火箭发动机的感兴趣区域进行精细快速重建的方法, 该方法相对全局ART(代数重建法)重建算法来说, 能在保持同等分辨率的情况下节省大量时间, 有利于工程实践。

1 快速整体重建

解析法是目前应用最广泛的方法, 包括傅里叶变换重建、滤波反投影和卷积反投影等方法。解析法在实际数据采集时无法避免噪声, 在某些情况下, 由于被测物体体积较大, 无法采集到完整的数据, 因此在实际工业中受到了限制^[5-6]。笔者所用的数据

收稿日期: 2017-08-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61171177); 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ240803); 山西省科技攻关资助项目(20140321010-02)

作者简介: 甄 妮(1991—), 女, 硕士, 主要研究方向为图像处理与重建

通信作者: 甄 妮, 451279396@qq.com

均为完整数据, 拟采用等角扇束滤波反投影法进行快速整体重建。

(1) 修正投影函数

假定 β 角下的投影函数是 $p_\beta(\gamma)$, 若以等角度 $\Delta\gamma$ 采样, 则有

$$p_\beta(\gamma) = p_\beta(n\Delta\gamma) \quad (1)$$

式中: n 为等角度 $\Delta\gamma$ 的个数。

得到修正后的投影函数为

$$P_\beta(n\Delta\gamma) = p_\beta(n\Delta\lambda)D \cos(n\Delta\gamma) \quad (2)$$

$$\Delta\gamma = \arcsin\left(\frac{2}{D \cdot N}\right) \quad (3)$$

式中: D 为射线源到旋转中心的距离; N 为探测器通道数。

(2) 加入滤波函数

投影数据修正后与 R-L 滤波函数 $h'(\gamma)$ 作卷积运算, 得到

$$C_\beta(n\Delta\gamma) = P_\beta(n\Delta\gamma) * h'(n\Delta\gamma) \quad (4)$$

$$h'(n\Delta\gamma) = \frac{(n\Delta\gamma)^2}{2 \sin^2(n\Delta\gamma)} h(n\Delta\gamma) \quad (5)$$

(3) 加权反投影

将得到的卷积计算结果 $C_\beta(n\Delta\gamma)$ 乘以权重因子 $1/L^2$, 再作反投影, 得到所需图像 $f(\gamma, \phi)$ 。

扇束滤波反投影重建的公式为

$$f(r, \phi) = \int_0^{2\pi} \frac{1}{L^2} [p^f(\gamma, \beta) D \cos \gamma] \times \frac{\gamma^2}{2 \sin^2 \gamma} h(\gamma) d\beta \quad (6)$$

$$L = \sqrt{D^2 + r^2 + 2Dr \sin(\beta - \phi)} \quad (7)$$

$$\gamma = \arcsin \frac{r \cos(\phi - \beta)}{\sqrt{D^2 + r^2 + 2Dr \sin(\beta - \phi)}} \quad (8)$$

式中: r 为重建点的极坐标; ϕ 为笛卡尔坐标。

2 基于 ROI 的精细重建

2.1 ROI 的划定

利用得到的快速整体重建图像可得到缺陷所在的位置以及对应的坐标, 通过计算得到 ROI 的圆心及半径, 再利用圆心及半径得到一个圆形 ROI。

2.2 对 ROI 重建

迭代法中最基本的是 ART, 其基本思想是先将被测物体离散化为多个像素, 再求解一个大型的线性方程组。迭代法虽然计算量大, 重建速度慢, 但是对数据完整性要求低, 重建得到的图像也较好。ART 重建法的迭代公式为

$$p_i = \sum_{n=0}^{J-1} w_{in} x_n^{(k)} \\ x_j^{(k+1)} = x_j^{(k)} + \lambda_k \frac{\sum_{n=0}^{J-1} w_{in}^2}{\sum_{n=0}^{J-1} w_{in}^2} w_{ij} \quad (9)$$

式中: k 为迭代次数; p_i 为实际的投影值; w_{ij} 为权因子; λ_k 为第 k 次迭代过程中的松弛因子, $\lambda \in (0, 2)$; J 为像素序号的最大值; w_{in} 为权因子。

重建步骤是:

(1) 建立直角坐标系, 确定射线源坐标以及离散化后被测物体的每个像素单元的坐标、探测器探测单元的坐标。

(2) 设定图像的初值, 令 $x^{(0)} = 0$ 。

(3) 在一个投影方向下, 确定当前射线的方程, 计算当前射线穿过被测物体的像素单元的权值 w_{ij} 。

(4) 计算投影的估计值 $\hat{p}_i = \sum_{n=0}^{J-1} w_{in} x_n^{(k)}$, 以及

$w_i = \sum_{n=0}^{J-1} w_{in}^2$, 当前射线对经过的像素单元像素值的更新系数为 $C = (p_i - \hat{p}_i)/w_i$ 。

(5) 用第(4)步得到的更新系数 C 修正第 i 条射线经过的像素单元。

(6) 对该投影方向下的所有射线重复步骤(3)~(5), 完成该方向下所有射线对重建图像的更新。

(7) 对其余的投影方向重复步骤(3)~(6), 直到完成所有投影方向下的所有射线对重建图像的更新, 即完成一次迭代。

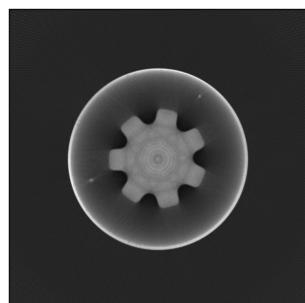
(8) 将上一次迭代重建的结果作为初值, 重复步骤(3)~(7), 开始下一次迭代, 直到重建图像满足一定的收敛准则。

3 针对某固体火箭发动机的 ROI 重建

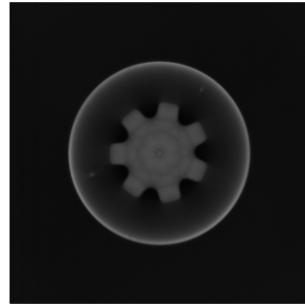
某固体火箭发动机模拟件的 CT 检测采集的射线源电压为 290 kV, 电流为 1.8 mA。平板探测器有 1920×1536 个探测单元, 每个探测单元的大小为 0.127 mm。射线源到旋转中心的距离为 1060 mm, 旋转中心到探测器的距离为 140 mm。物体绕旋转中心旋转 360° , 每隔 1° 采集 1 幅投影图像。且该固体火箭发动机模型中间填充了高密度的人工炸药, 上面有 2 个深浅不同的人工设计孔缺陷。

对某固体火箭发动机先采用解析法和代数迭代法分别进行全局重建, 可以得到如图 1, 2 所示的重建模型。解析法对全局的重建时间为 86 s, 代数迭代法对全局的重建时间为 1 398 s。

由试验结果可以得出, 解析法时间很短, 但是得

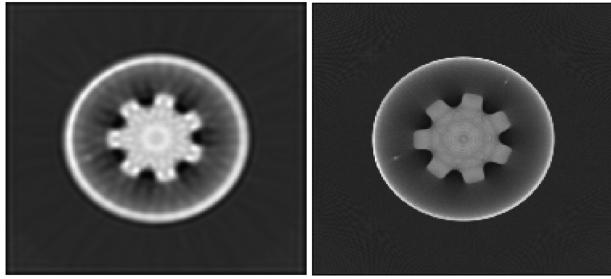


(a) 等角扇束滤波反投影重建图(等角间隔为0.01°)



(b) 代数迭代重建图

图 1 某固体火箭发动机的等角扇束滤波反投影重建图和代数迭代重建图



(a) 等角扇束为1°的重建图像 (b) 等角扇束为0.01°的重建图像

图 2 不同样等角扇束的重建图

到的重建结果噪声比较大,图像较为模糊;迭代法得到的图像明显比解析法得到的图像清晰,但是迭代法耗费的时间较长。

笔者提出的算法很好地解决了上述问题,具体步骤如下所述。

(1) 首先对固体火箭发动机的投影数据进行低分辨率等角扇束滤波反投影算法,重建图像大小为 512×512 ,设定的等角分别为 $1^\circ, 0.01^\circ$,可以得到不同等角扇束重建图(见图 2),可以看出等角扇束为 0.01° 时重建得到的图像更清晰,因此选择用等角扇束为 0.01° 来进行快速重建,结果如图 3 所示。

(2) 从图 3 可以看出,固体火箭发动机模型有两个设计孔缺陷,大致的缺陷坐标为(140, 290), (330, 145),通过计算分析确定 ROI 圆心坐标为(198, 218),半径为 128,得到的圆形 ROI 划定如图 4 所示。

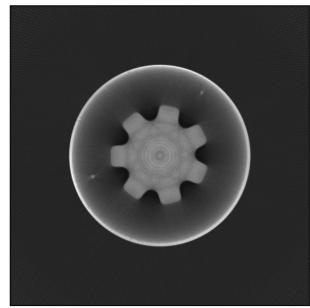
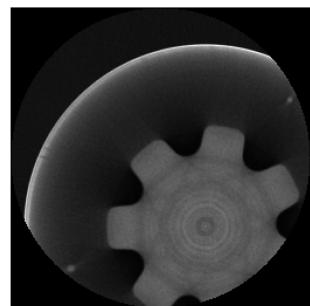
图 3 等角扇束为 0.01° 的滤波反投影重建图

图 4 圆形 ROI 划定

(3) 对所得到的 ROI 图做精细迭代重建,设定图像初值为 0,松弛因子为 0.15,迭代次数为 25,探测器通道个数为 729,投影数据访问方式为顺序访问。得到感兴趣区域的重建图如图 5 所示。

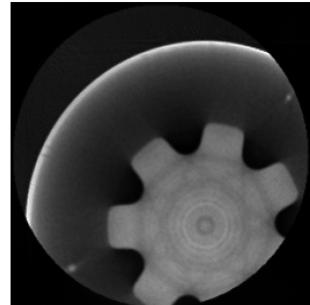


图 5 感兴趣区域重建图

文中提出的解析法所用时间为 86 s,迭代法为 282 s,一共只需要 368 s,而对整个固体火箭发动机的迭代重建需要 1 398 s,全局迭代重建时间较 ROI 重建时间多了 3 倍。

4 结语

在实际检测中,对被检工件进行 CT 整体检测的重建数据量大,重建时间长,而人们感兴趣的往往是内部有无缺陷以及缺陷的局部信息。缺陷的出现具有一定的随机性,无法依靠一般的局部重建在检测开始前就确定重建区域,而且并不是工件的每一个部分都需要用最高的空间分辨率进行检查。如果

(下转第 63 页)

与距离曲线非线性多项式拟合函数公式更适合应用于实际检测中的接近管距离的计算。

5 结论

(1) 接近信号在频率为 100 kHz 和与之对应的测量通道为 CH6 时的接近信号最敏感,检测灵敏度最高。

(2) 数据分析时测量的变化量为发生接近的最大变化量上升沿信号,即 5AVB 和 6AVB 之间的变化量,测量方式为最大垂直法,此测量方式可用于实际接近管的信号测量。

(3) 根据数据分析结果绘制出了接近信号的幅值与距离曲线,电压基本随接近距离的减小而逐渐增大,成反比关系,并且当接近距离超过 3 mm 时电压基本保持不变,在实际检测中此曲线可用于接近管距离的计算。

(4) 通过幅值与距离曲线的非线性拟合得到了函数 $y = 0.084x^2 - 0.524x + 0.972$,在实际检测中也可参考此公式进行传热管接近距离的计算。

(上接第 52 页)

可以确定重点可疑区域,即工件的 ROI,则可以通过重建高分辨率局部感兴趣图像来判断该区域有无缺陷,如同医生通过 CT 诊断病情一样,不仅可以实现缺陷的可视化检测,而且通过对局部数据进行重建,减少了数据的采集时间和重建时间,也提高了数据扫描和数据重建的速度。

参考文献:

- [1] 杨娟. 锥束工业 CT 重建算法及伪影校正技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [2] 王浩. CT 不完全投影数据重建算法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [3] 李亮, 陈志强, 康克军. CT 局部重建算法发展综述[J]. 核电子学与探测技术, 2005, 25(6): 881-886.
- [4] 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.
- [5] 黄力宇, 朱守平, 匡涛. 医学断层图像重建仿真实验[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2015.
- [6] 赵双任, 杨新铁. 图像重建的分块迭代算法[J]. 中国科技论文, 2006, 1(4): 301-308.

(5) 接近管的记录阈值一般由检测实施单位根据蒸汽发生器制造和设计单位给出的具体要求确定,M310 堆型传热管安装时制造和设计单位给出的接近距离预警值为 2 mm,因此根据本试验的幅值与距离曲线将接近阈值设置为 0.3 V,同时由于接近管检测是近年来提出的新技术,记录阈值也仅是通过单纯试验获得,待有了大量实际数据后会进一步完善。

参考文献:

- [1] 李跃忠, 韩良弼, 王柏松. 蒸汽发生器管束的固有振动分析[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(增刊): 458-462.
- [2] 丁训慎. 蒸汽发生器传热管的微振磨损及其防护[J]. 核安全, 2006(3): 27-32.
- [3] 雷凯. 蒸汽发生器传热管弯头防振条结构工艺与材料改进[J]. 核电工程与技术, 2002, 15(1): 18-21.
- [4] 任吉林, 林俊明, 徐可北. 涡流检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [5] 孔玉莹, 李金强, 马强, 等. 蒸汽发生器传热管与防振条间隙的涡流检测[J]. 无损检测, 2016, 38(3): 75-78.

(上接第 57 页)

数相同的条件下,随着管电压的增加,散射比呈减小的趋势。在射线检测时,影像质量的影响因素较多,提高管电压能降低散射比,但是较高的管电压也会降低对比度、增大固有不清晰度,使影像质量下降。

参考文献:

- [1] 美国无损检测学会. 美国无损检测手册—射线卷[M]. 上海: 世界图书出版公司, 1992.
- [2] 全国特种设备无损检测人员资格考核统编教材编审委员会. 射线检测[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2007.
- [3] 彭光含, 蔡新华, 乔闹生, 等. X 射线源透射式工业计算机断层扫描成像技术在复合材料工件检测中的散射修正[J]. 无损检测, 2007, 29(4): 181-184.
- [4] 张小海, 邬冠华, 敖波. 射线检测[M]. 南昌: 机械工业出版社, 2012.
- [5] 于漫漫, 高洪波, 李泽, 等. TC4 和 GH4169 合金 X 射线散射比的测定及分析[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2013, 35(3): 93-97.
- [6] 兑卫真, 杨晓华. 金属材料 X 射线散射比的测定[J]. 热处理, 2001(2): 29-31.