

文章编号:1000-8055(2011)11-2433-06

ICT 辅助涡轮叶片内冷通道多余物检测方法

杨 民¹, 孙晶晶¹, 李兴东², 魏东波¹

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 中国计量科学研究院 电离辐射与医学工程计量科学研究所, 北京 100013)

摘 要: 为了实现涡轮叶片内冷通道多余物的无损检测与高精度提取,以工业计算机断层扫描技术为检测手段,基于刚性变换与正弦投影之间的关系,求得待测试件与标准试件断层图像方位上的位移参数,对测试件断层正弦图与标准件对应断层正弦图进行配准,提取出多余物正弦图并重建出多余物断层图像. 实验证明该方法能有效识别出叶片内冷通道内的多余物,相比传统的基于 CT(computed tomography)图像的多余物提取算法,该算法在投影域内进行,不受投影数据不完全、扫描系统偏差以及重建伪影的影响,具有更高的准确性.

关 键 词: 多余物; 工业计算机断层扫描 (ICT); 涡轮叶片; 图像配准; X-射线检测

中图分类号: V233

文献标志码: A

ICT assisted detection for remainders in the internal cooling channel of the turbine blade

YANG Min¹, SUN Jing-jing¹, LI Xing-dong², WEI Dong-bo¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Division of Metrology in Ionizing Radiation and Medicine,
National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to detect remainders in the internal cooling channels by non-destructive means with high accuracy, industrial computed tomography was used to scan the tested blade. The position displacement parameters between the tested blade and the standard specimen were calculated base on the rigid transformation and sinogram projection. Then the sinograms of the scanned slice and the corresponding standard slice were matched together in order to extract the sinogram of the remainders and the reconstructed images of them were obtained. The experimental results prove that this method can extract remainders in the internal cooling channels effectively. Compared to the traditional remainder extraction algorithm based on CT (computed tomography) image, the proposed algorithm is realized in the projection domain, and it is rarely affected by projection data incompleteness, scanning system bias and the reconstruction artifacts, so it has a higher accuracy.

Key words: remainder; industrial computed tomography (ICT); turbine blade; image registration; X-ray testing

收稿日期:2010-11-17; 修订日期:2011-06-29

基金项目:国家自然科学基金(60872080,61077011); 国家科技支撑项目(2011BAI02B02)

作者简介:杨民(1975—),男,陕西蒲城人,副教授,博士,主要从事射线数字影像处理、CT理论与应用研究.

E-mail: minyang.ndt@263.net

内部通道冷却是燃气轮机涡轮叶片的主要冷却方式之一^[1-2],叶片的内部结构是决定冷却性能的关键性因素.该类叶片采用多个独立通道或者用多个冷却孔串联,有的还利用肋槽、凸台、扰流柱、凹坑等粗糙面来扩大有效环特面积并增加湍流强度,提高传热系数.由于内冷叶片冷却通道的结构复杂,制作、加工、工作过程中难免会引入多余物留存在内冷通道中,对通道壁造成磨损甚至堵塞内冷通道,影响内冷通道的流场和换热,从而造成涡轮叶片的失效.因此研究涡轮叶片内冷通道中多余物的检测方法对提高涡轮叶片的使用寿命、防止发动机事故有着重要的意义.目前对于叶片内部质量信息的检测使用频次最高和最有效的手段是 X 射线检测,其中包括 DR(digital radiography)成像和 ICT(industrial computed tomography)层析. DR 检测所获取的为叶片沿射线方向的积分图像,存在信息重叠的问题,无法对缺陷进行空间定位^[3]; ICT 层析利用叶片不同视角下的 DR 图像反解出叶片内外部结构和质量状态信息,可实现对叶片内部缺陷的空间定位与结构逆求.目前, ICT 技术已在涡轮叶片的无损检测中得到了成功的应用,如文献[4]基于叶片 CT 图像,配合矩匹配算法实现了叶片壁厚的高精度测量;文献[5]基于叶片三维 ICT 图像和亚像素轮廓追踪技术得到了叶片内外形面的点云数据.本文采用计算机断层扫描技术解决叶片内冷通道中多余物的检测识别,是对 ICT 技术在叶片质量控制方面的一种新尝试.

1 正弦图配准

CT 扫描系统示意图如图 1 所示. CT 扫描的过程为:探测器和射线源不动,检台绕中心旋转,探测器采集被扫描断层在不同旋转角(这里称为投影角)下的投影数据.探测器在每个投影角下采集的投影信息为一维数据,将 360° 范围内的所有投影角下的一维投影数据依次排列起来,便构成二维数据,称为正弦图.正弦图坐标系为 (s, θ) ,如图 2 所示, θ 为转台的旋转角度, s 为 S 轴上探测器的探元坐标,也是投影点到旋转中心的距离.如果被扫描叶片内存在多余物,那么多余物的投影信息就会反映在正弦图中,利用这一点,将其与合格的标准叶片对应断层的正弦图进行对比,即可实现多余物的自动提取.但是在 CT 扫描的过程中,被检测件与标准件的放置方位很难保持一致,这种放置方位的差异会引起两者的正弦图存

在差异,从而不能简单地将标准断层的正弦图作为背景模板与被扫描断层的正弦图相减得出多余物的投影信息,因此需要将两幅正弦图配准到一个坐标系和放置方位中方能得到正确的结果. CT 扫描中物体放置位置的变化可以理解为物体在空间中的坐标变换.一般情况下,被扫描断层的位置差异可理解为两个被扫描断层在断层坐标系 XY 平面上的平移和绕旋转轴(Z 轴)的转动,这种位置移动可以看成是物体的二维刚性坐标变换.

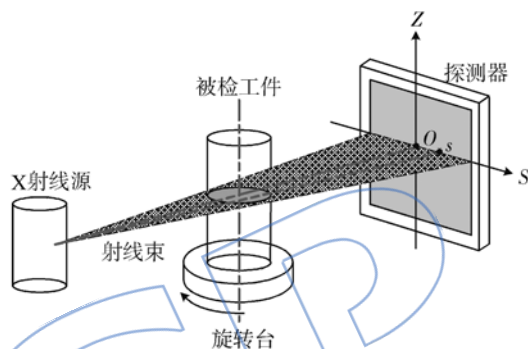


图 1 CT 检测系统示意图

Fig. 1 Sketch map of CT scanning system

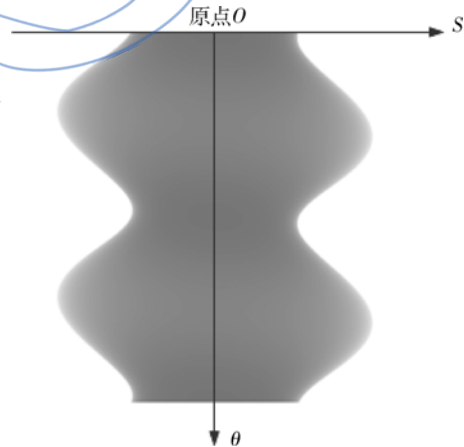


图 2 正弦图及其坐标系

Fig. 2 Sinogram and its coordinate system

1.1 二维刚性变换和投影间的关系

二维刚性变换可以通过平面内基本的旋转和平移变换组合而成,每一个变换都可以表示成为矩阵的形式,刚性变换则可以表示为一系列矩阵的乘积.被扫描断层的位置与标准件扫描断层的位置之间存在二维刚性变换,则意味着标准件中的任意一点 (x_r, y_r) 与被检工件中对应的点 (x_f, y_f) 之间存在以下变换关系:点 (x_r, y_r) 在 XY 平面内绕旋转轴 Z 轴转动 α 角,并在 XY 平面内沿方向角 β 移动距离 r ,坐标变为 (x_f, y_f) ,如图 3

所示. 矩阵变换如式(1)所示.

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \end{bmatrix}' = \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix}' \mathbf{R}_Z(\alpha) \mathbf{T}(r, \beta) \quad (1)$$

其中矩阵 $\mathbf{R}_Z(\alpha)$, $\mathbf{T}(r, \beta)$ 分别称为刚性变换的旋转矩阵和平移矩阵, 其中

$$\mathbf{R}_Z(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{T}(r, \beta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ r \cos \beta & r \sin \beta & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

因此 (x_r, y_r) 与 (x_f, y_f) 间的关系如式(4)所示

$$\begin{cases} x_f = x_r \cos \alpha + y_r \sin \alpha + r \cos \beta \\ y_f = -x_r \sin \alpha + y_r \cos \alpha + r \sin \beta \\ z_f = z_r \end{cases} \quad (4)$$

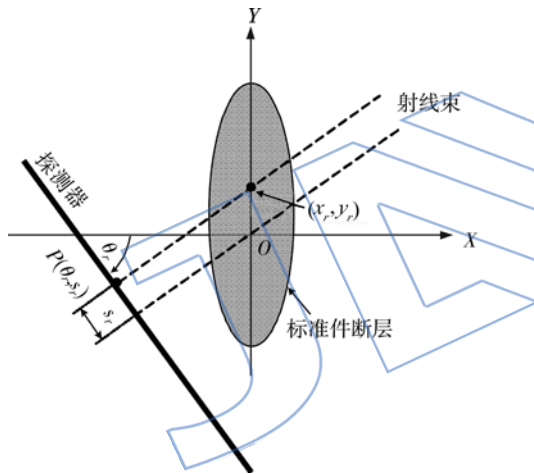


图 3 二维刚性变换与投影关系示意图

Fig. 3 Relationship schematic diagram between rigid transformation and projection

被检工件与标准件在平行束采集方式下采集的投影如图 3 所示, 经过标准件中任意一点 (x_r, y_r) 的投影记为 $P(\theta_r, s_r)$, 经过被测工件中对应点 (x_f, y_f) 的投影记为 $P(\theta_f, s_f)$, 其表达式为

$$P(\theta_r, s_r) =$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(x_r, y_r) \delta(x_r \cos \theta_r - y_r \sin \theta_r - s_r) dx_r dy_r \quad (5)$$

$$P(\theta_f, s_f) =$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(x_f, y_f) \delta(x_f \cos \theta_f - y_f \sin \theta_f - s_f) dx_f dy_f \quad (6)$$

其中 $u(x_r, y_r) = u(x_f, y_f)$, 表示线性衰减系数, (θ_r, s_r) , (θ_f, s_f) 表示投影在两个正弦图中的坐标. 由式(4)~式(6)推导可得

$$\begin{aligned} x_f \cos \theta_f - y_f \sin \theta_f - s_f &= \\ x_r \cos(\theta_r + \alpha) - y_r \sin(\theta_r + \alpha) + r \cos(\theta_r + \beta) - s_r \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可以看出投影在两个正弦图中的坐标存在以下关系:

$$\begin{cases} \theta_f = \theta_r + \alpha \\ s_f = s_r - r \cos(\theta_r + \beta) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)说明存在扫描方位差异的两个相同断层的正弦图所包含的信息是一样的, 只不过在 θ 坐标轴上相差了刚性旋转变换的角度 α , 并且水平坐标 s 之差是与平移变换的幅值、方向角有关的正弦函数^[6-8].

1.2 正弦图的配准算法

基于以上分析, 本文提出了以下的正弦图配准算法. 设被测工件在位置 1 时采集的投影为 P_r , 旋转中心偏移量为 ms_r , 标准件在位置 2 时采集的投影为 P_f , 旋转中心偏移量为 ms_f , 两次采集的步进角均为 $\Delta\theta$, 每次采集投影 M 幅 ($M = 360/\Delta\theta$). 配准步骤如下:

1) 预处理

首先利用投影 P_r, P_f 求取各自的旋转中心偏移量 ms_r, ms_f ^[9], 然后按照 $P_r(i, j) = P_r(i, j - ms_r)$, $P_f(i, j) = P_f(i, j - ms_f)$ 进行旋转中心偏移的校正, 然后将扇束扫描结构下的投影重排为平行束扫描结构下的投影^[10], 最后按照背景值为 0, 投影最大值为 255 的原则对正弦图在 $[0, 255]$ 内进行归一化处理.

2) 求二维刚性变换参数 α

对投影 P_r, P_f 的每行数据进行自相关运算,

分别得到两组自相关投影,记为 P_d 和 P_e ,其中 P_d 中的第 i 行数据是 P_r 第 i 行投影的自相关序列; P_e 中的第 i 行数据是 P_f 第 i 行投影的自相关序列, $i \in [1, M]$, M 代表投影幅数. 将图像 P_d 沿投影角 θ 正方向(图 2 所示)平移 n 行得到 P'_d , $n \in [1, M]$. 求 P'_d 与 P_e 的残差 $\Delta(n)$, 其中残差最小时所对应的平移次数 $n=N$ 与断层旋转角度差异 α 存在以下的关系: $\alpha = N \cdot \Delta\theta$.

3) 求取物体平移的参数 (r, β)

求投影 P_r 的第 $i+N$ 行和投影 P_f 的第 i 行的互相关序列 P_x , 将互相关序列 P_x 图像中每行中最大值的位置记为 $w(i)$, $i \in [1, M]$, 对序列 $w(i)$ 做傅里叶变换, 频域内的模的最大值即为工件在 XY 平面内的平移距离 r , 该频率处的相位角为工件在 XY 平面内的平移方向角 β .

4) 投影配准

将投影 P_r 沿投影角 θ 正方向平移 N 行, 并对平移后的每一行投影数据按照公式 $s_{\text{new}} = s_r - r \cos(\theta_r + \beta)$ 在 S 方向平移, 由此得到配准后的新的投影 P_{move} .

2 正弦图的对比分析

当按照 1.2 节所示的算法将被测工件的正弦图和标准件的正弦图配准到同一坐标系和相同放置方位之后, 即可对两幅图进行对比分析, 得到多余物的正弦图.

由于 Radon 变换在理想条件下是线性变换, 因此在不考虑系统的散射、硬化等条件下, 含有多余物的测试件扫描得到的正弦图相当于标准件的正弦图与多余物的正弦图相加的结果. 在识别多余物的过程中只需要将配准后的两幅正弦图相减就可以得到多余物的正弦图. 但是由于实际中配准总会存在一定的误差, 因此还需要进行进一步的处理才可以得到多余物的正弦图. 考虑到多余物在 Radon 空间中是连续函数, 本文提出了以下步骤对正弦图进行分析对比:

1) 将配准后测试件的正弦图与标准件的正弦图相减得到多余物初步的正弦图

$$P_f - P_{\text{move}} = P_{\text{obj1}}$$

2) 由于投影值不可能为负数, 因此将 P_{obj1} 中小于零的元素都赋值为零得到 P_{obj2} ;

3) 对 P_{obj2} 进行 Otsu 分割^[11], 建立目标区域内的各个连通区域, 对各个连通区域进行判断, 如果该连通区域没有贯穿 $0 \sim M$ 行, 则认为该区域为配准的误差区域, 并不是多余物的投影信息, 将

该区域从目标区域内删除;

4) P_{obj2} 仅保存目标区域内的值, 其余区域赋值为零, 得到最终的多余物的正弦图.

3 实验结果

本文采用某一带有人工多余物的涡轮叶片测试件进行试验, 其 DR 图像如图 4 所示, 图中可以清晰地看到两个多余物所处的位置, 对位置 1 处的断层进行扫描, 以验证算法的可行性. 实验条件如下: 采集测试件的 720 幅投影数据, 射线源到探测器的距离为 1100 mm, 探测器探元尺寸为 0.127 mm, 射线源管电压为 310 kV, 管电流为 2.0 mA, 采用 Shepp-Logan(S-L)滤波重建. 测试件在位置 1 处重建的断层图像如图 5 所示. 此外对不含多余物的标准件在同一位置也进行断层扫描, 重建得到的标准件同一位置处的断层图像如图 6 所示, 对比图 5 和图 6 可以看出在涡轮叶片的两个内流通道中心处存在多余物. 测试件在位置 1 处扫描得到的正弦图如图 7 所示, 标准件在同一位置处的正弦图如图 8 所示. 由图 5~图 8 可以看出, 虽然两幅 CT 图像除去多余物外形状相同, 但是由于扫描时放置方位难以保证一致, 从而扫描的正弦图存在着较大差异, 表现为两幅 CT 图像存在方位差异.

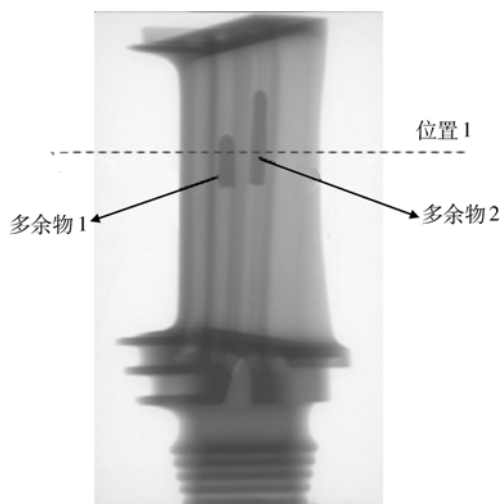


图 4 测试件的 DR 图像

Fig. 4 DR image of the tested blade

通过刚性配准后提取出的多余物正弦图如图 9 所示, 重建后的多余物断层图像如图 10 所示. 为了考察多余物提取的精度, 将多余物重建图像与原始断层图像(图 5)相减, 得到图 11 所示的去除多余物的断层图像. 可以看出, 受射束硬化、散



图 5 测试件位置 1 处的 CT 图像

Fig. 5 CT image at position 1 of the tested blade



图 9 多余物的正弦图

Fig. 9 Sinogram of the remainders



图 6 标准件位置 1 处的 CT 图像

Fig. 6 CT image at position 1 of the standard blade



图 10 多余物的 CT 图像

Fig. 10 CT image of the remainders

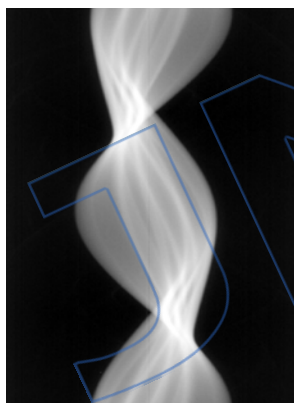


图 7 测试件位置 1 处扫描得到的正弦图

Fig. 7 Sinogram at position 1 of the tested blade



图 8 标准件位置 1 处扫描得到的正弦图

Fig. 8 Sinogram at position 1 of the standard blade



图 11 去除多余物的叶片 CT 图像

Fig. 11 CT image after eliminating the remainders

射^[12],以及多余物正弦图提取过程中图像分割误差的影响,导致了提取出的多余物尺寸存在偏差.本文还对多余物的提取精度进行了初步的分析:单独对多余物进行层析扫描,获得其断层图像作为多余物的理想图像,将其与提取出的多余物断层图像进行比较,测得多余物断层的实际面积为 183 pixel^2 像素,而提取出的多余物断层的面积为 167 pixel^2 ,相对误差为 8.7% ,有待于在后期的研究中进一步提高精度.

4 总 结

本文提出的叶片内冷通道多余物自动检测算法需要提供一个不存在任何多余物的标准件,通过将测试件扫描所得的正弦图与标准件扫描所得

的正弦图进行配准,就可以对多余物进行提取.相比传统的对CT图像进行配准和对比分析的多余物检测算法,本文提出的算法是在重建之前的投影域内进行的,在投影数据不完全、扫描系统存在偏差的情况也能适用,而且不需要人工进行干预,可以实现对多余物的自动检测.但是由于配准精度和射束硬化现象的影响,本文提出的多余物的自动检测精度还不够理想,未来可以通过提高正弦图的配准精度以及对正弦图进行射束硬化校正来提高自动检测多余物的精度.

参考文献:

- [1] 倪萌,朱惠人,裴云,等.航空发动机涡轮叶片冷却技术综述[J].燃气轮机技术,2005,18(4):25-32.
NI Meng, ZHU Hui ren, QIU Yun, et al. Review of aero-turbine blade cooling technologies[J]. Gas Turbine Technology, 2005, 18(4): 25-32. (in Chinese)
- [2] 苏生,胡捷,刘建军,等.内部结构对空冷叶片换热性能的影响[J].热能动力工程,2008,23(6):567-571.
SU Sheng, HU Jie, LIU Jianjun, et al. The influence of inner structures on the heat exchange performance of air-cooled blades[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(6): 567-571. (in Chinese)
- [3] 孔凡琴,路宏年.基于数字射线成像的航空发动机涡轮叶片缺陷尺寸的自动测定[J].兵工学报,2005,26(3):335-337.
KONG Fanqin, LU Hongnian. The measurement to the defection on the turbine-vane of the aeroengine based on the digital radiography[J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(3): 335-337. (in Chinese)
- [4] 傅健,路宏年,侯涛,等.基于ICT图像的航空发动机涡轮叶片壁厚尺寸精密测量方法[J].航空学报,2006,27(2):326-330.
FU Jian, LU Hongnian, HOU Tao, et al. Wall thickness precision measurement method for air engine turbine blade based on ICT images[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(2): 326-330. (in Chinese)
- [5] 杨民,孙翠丽,戚琦.基于3D-ICT图像的涡轮叶片形面点云高精度提取技术[J].计算机辅助设计与图形学学报,2007,19(9):1212-1217.
YANG Min, SUN Cuili, QI Qi. The method of extracting surface point cloud of the turbine blade with high accuracy based on 3D-ICT images[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2007, 19(9): 1212-1217. (in Chinese)
- [6] Fitchard E. Registration of synthetic tomographic projection data sets using cross-correlation[J]. Physics in Medicine and Biology, 1998, 43(6): 1645-1657.
- [7] Fitchard E. Registration using tomographic projection files[J]. Physics in Medicine and Biology, 1999, 44(2): 495-507.
- [8] Mao W H, Li T F, Wink N. CT image registration in sinogram space[J]. Medical Physics, 2007, 34(9): 3596-602.
- [9] 李保磊,傅健,黄巧珍,等.基于正弦图的工业CT系统旋转中心的自动确定方法[J].航空学报,2009,30(7):1341-1345.
LI Baolei, FU Jian, HUANG Qiaozhen, et al. Method for automatic determination of center of rotation in industrial computed tomography systems based on sinogram[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(7): 1341-1345. (in Chinese)
- [10] 邹晓兵,曾理.重排的半覆盖螺旋锥束CT的反投影滤波重建[J].光学精密工程,2010,18(9):2077-2084.
ZOU Xiaobing, ZENG Li. Rebinning BPF reconstruction for helical cone-beam CT with half-cover scanning[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(9): 2077-2084. (in Chinese)
- [11] 万磊,白洪亮,戴军.扩展的Otsu最优阈值图像分割的实现方法[J].哈尔滨工程大学学报,2003,24(3):326-329.
WAN Lei, BAI Hongliang, DAI Jun. Extended optimal Otsu thresholding method of image segmentation[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2003, 24(3): 326-329. (in Chinese)
- [12] Ramakrishna R, Muralidhar K, Munshi P. Beam-hardening in simulated X-ray tomography[J]. NDT & E International, 2006, 39(6): 449-457.