

涡轮叶片锥束 CT 重建质量优化

高显亮, 高鸿波, 崔凯歌, 张士晶, 邬冠华, 张小海

(南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 江西南昌 330063)

摘要: 介绍了自主开发的锥束X射线CT检测系统的组成, 利用该系统对某型精铸涡轮叶片试样进行了CT扫描与重建, 对其叶型轮廓特征实现了三维可视化显示。讨论了透照管电压、旋转轴倾斜校正、投影数量以及滤波等因素对重建质量的影响。通过研究涡轮叶片叶身CT重建质量的影响因素有助于拓展CT技术在叶片检测领域的应用, 实现对叶型偏差分析, 叶片铸造缺陷的定位和量化以及叶片壁厚的精确测量。

关键词: 涡轮叶片; 锥束CT; CT扫描与重建; 三维可视化; 无损检测

工业计算机断层成像技术是依据外部投影数据重建物体内部结构图像的无损检测技术^[1]。由于工业CT可以在非接触的条件下获得物体三维结构信息, 在无损检测、测量技术、结构分析等方面都显示了特有的优势, 被广泛应用于现代工业的各个领域^[2-5]。锥束CT是利用锥形射线束和面阵列探测器采集投影图像, 并采用相应的重建算法重建出物体三维结构的成像技术, 是一种三维CT。与传统二维CT相比, 锥束CT具有扫描速度快、射线利用率高、空间分辨率高且各向同性等优点^[6], 是CT应用的主流产品^[7-8], 也是CT研究领域的热点。国内外关于锥束CT的研究大多朝着快速重建算法^[9-11]、几何校正^[12-14]、散射校正^[15]、金属伪影校正^[16]等方向开展。同时, 锥束CT设备朝着高精度数控系统、微纳米分辨率或高能射线方向发展。

叶片是航空燃气涡轮发动机的重要零件, 叶片设计与制造的好坏直接决定了航空发动机的性能、安全与寿命^[17]。对涡轮叶片的研究一直是航空领域的重要课题^[18-20]。由于工业CT重建可获得被检物体内部三维结构信息, 被越来越多地运用到涡轮叶片缺陷检测^[21]、残余型芯检测^[22]、结构分析^[23]、疲劳行为分析^[24]、叶片壁厚测量^[25]等工作中。

随着科学技术的发展, CT技术的应用面和应用需求都将不断增加。针对工业CT的应用现状和发展前景, 本研究以认识锥束CT技术原理、了解CT重建质量影响因素、降低CT检测成本和促进CT技术推广为目的, 以实验室现有二维数字射线(DR)设备为硬件基础, 通过增加机械装置及其运动控制系统, 编写CT扫描上位机软件, 研制了一套工业CT系统。用该系统对航空发动机涡轮叶片进行CT重建, 验证该系统进行CT重建的可行性, 并通过多组试验研究重建质量的影响因素及改善方法。

1 系统组成与CT扫描

1.1 系统组成

文中所述CT系统是在原有数字射线(DR)设备的基础上, 通过增加机械系统模块和上位机软件模块所构成。该CT系统组成如图1所示。

该CT系统各模块构成及功能如下:

①射线源: GE公司ISOVOLT320 TitanE型X射线机, 最高管电压320 kV, 焦点尺寸可选0.4/1.0 mm。②探测器: PerkinElmer公司XRD 0822数字X射线探测器, 成

作者简介:

高显亮(1994-), 男, 硕士生, 研究方向为射线检测技术。E-mail: 1753598799@qq.com

通讯作者:

高鸿波, 男, 博士。E-mail: ghbhi@163.com

中图分类号: TG391.41

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)05-0510-07

基金项目:

创新创业课程培训项目(KCPY1773); 教育部重点实验室开放基金(EW201908088)。

收稿日期:

2019-10-11 收到初稿, 2020-01-16 收到修订稿。

像矩阵 1024×1024 ，探测器单元尺寸 $200 \mu\text{m}$ ，16位AD转换。③机械运动装置及其控制系统：机械硬件是一套具有X、Y、Z、R四轴的运动平台，其中X、Y轴为平移运动，负责工件在水平面上的位置移动，Z轴为升降轴，R轴为精密转台的旋转运动。机械控制系统是以运动控制器为核心的三轴运动控制系统，该系统可通过下位机程序对机械装置进行运动控制并与上位机进行通讯。④上位机软件系统：上位机软件包含投影图像同步采集和CT重建两部分。投影图像同步采集部分主要负责与下位机之间的通讯和探测器数据采集，通过上位机软件的控制，实现精密转台的分度运动，并以指定的步距同步采集被检物体的射线投影图像。CT重建由VGStudio MAX3.0软件完成，重建算法采用基于标准圆轨迹扫描的FBP（标准已过滤反向投影）重建算法。

1.2 CT扫描

根据锥束圆轨迹扫描CT重建原理^[26]，CT扫描前调整射线管、精密转台和平板探测器之间的相对位置，使射线源中心射线束穿过转台旋转中心，并垂直于平板探测器水平方向和竖直方向的中心点。CT扫描过程中，射线管始终以固定的管电压和管电流连续发出X射线，上位机软件、运动控制器、转台和平板探测器按图2所示时序进行循环工作。一个循环周期内，转台先转动一个角度后保持静止，转台静止时，探测器采集被检物体在该位置上的射线投影图像，采集完成后进入下一个循环周期，直至获得被检物体 360° 的投影图像。

2 试验结果分析

2.1 可行性分析

用上述CT系统对某型镍基高温合金航空发动机涡轮叶片进行了一次CT扫描与重建。如图3a所示，该叶片榫头部位为实心结构，厚度较大，叶身前后缘厚度差大，叶背侧有圆弧状突起结构，叶身靠前缘部位有贯穿的孔型结构，是典型的复杂结构构件。CT扫描参数为：射线管电压180 kV，管电流4 mA，探测器积分时间300 ms，焦距1 025 mm，源-物（射线源与转台

中心）距离790 mm，转台旋转步距 0.5° ，扫描范围 360° ，投影图像720张。选择基于圆轨迹扫描和锥束射线的FBP算法进行CT重建，重建结果三维可视化图像如图3b所示。

与图3a所示叶片实物相比，重建结果与实物基本保持了相同的结构形貌。但是，重建结果存在以下不足：第一，从三维可视化结果上看，在叶片榫头和叶背上都出现了严重的伪影，通过分析，榫头部位的隆起是透照过程中为固定叶片将其插入塑料泡沫中所致；第二，叶片边缘部位轮廓有残缺；第三，从图3b所示三维可视化图像和图3c所示切片图像可以看到明显重影。

上述试验结果一方面证明该系统能够实现涡轮叶片CT重建；另一方面，反映了该系统CT重建质量与检测要求之间还存在差距。由于CT重建质量受数控系统精度、几何位置误差、探测器成像质量、射线源性能、重建算法、扫描和重建参数等多方面的影响，本研究在其他环节一定的情况下，仅从部分扫描参数和重建参数入手，结合原理分析和试验结果，对重建质量的影响因素和改善方法进行探讨。

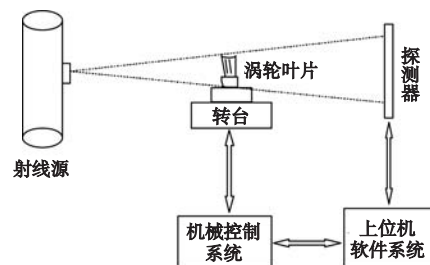


图1 系统组成

Fig. 1 System composition

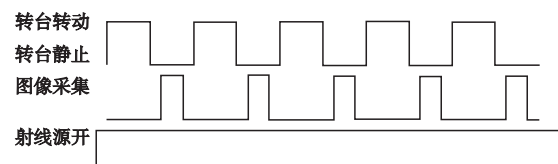
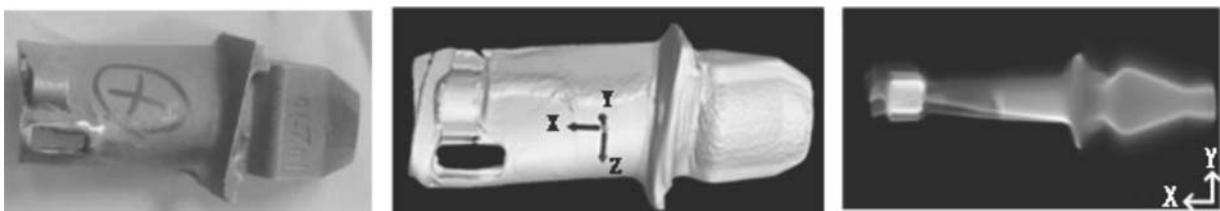


图2 CT扫描时序

Fig. 2 CT scan timing



(a) 涡轮叶片

(b) CT重建三维可视化结果

(c) CT重建结果切片图像

图3 验证试验重建结果

Fig. 3 Reconstruction results of verification test

2.2 重建质量影响因素研究

为探究扫描和重建参数对重建质量的影响，本研究使用控制变量法进行了一系列对比试验，试验主要参数如表1所示。

2.2.1 滤波对重建质量的影响

为研究射线源滤波对重建质量的影响，进行了对比试验1[#]与2[#]，试验1[#]中射线管发出的射线直接对叶片进行透照，试验2[#]在射线管窗口放置厚度为1 mm的铜板对射线进行滤波，两次试验其他透照参数和重建参数均相同。图4b、d所示为两次CT重建结果三维可视化图像对比，从图中可以看出，对射线源进行滤波可明显改善重建质量。对比图4b、d中区域1和区域2，滤波后的重建结果伪影明显减少，叶身后缘的结构残缺基本消失。

由于在射线管窗口放置了滤波板，射线束中波长较长的软射线被吸收，滤波板减小了通过叶片较薄部位和叶片周围的X射线强度，并减少了来自这些射线的

内切散射。对于叶片这种大厚度比和形状复杂的工件来说，该方法一方面可降低投影图像对比度，使同一幅投影图像具有更高的厚度宽容度，避免当较厚部位获得合适灰度时较薄部位过度曝光，从而避免在CT重建中出现结构残缺；另一方面，工件边缘和截面变化大的部位原来由于内切散射效应模糊了的图像，在使用了滤波板后对比度得以提高。由于滤波板附加了对射线的吸收，试验2[#]通过提高管电压进行了补偿。

图4a、c为两次试验中叶片在同一位置的投影图像。经测量和计算：未滤波投影图像的区域2与区域1灰度差为43 570，区域1信噪比为21.7；滤波后投影图像区域2与区域1灰度差为36 382，区域1信噪比为25.8。以上数据表明，对射线源进行滤波明显提高了投影图像的厚度宽容度和信噪比。此外，由投影图像可知，图4b、d区域2内部存在厚度突变，厚度突变引起的散射在重建结果中形成了伪影。有滤波的重建结果中伪影现象明显减少。

表1 CT扫描与重建主要参数对比
Table 1 Comparison of main parameters of CT scan and reconstruction

编号	管电压/kV	曝光量/(mA·ms)	铜板滤波/mm	轴倾斜校正/(°)	投影数量	源-物距离/mm
1 [#]	180	1 200	无	0	720	775
2 [#]	190	1 200	1	0/0.7	720	775
3 [#]	190	1 200	1	0.5/0.7/1/1.2	720	510
4 [#]	150	1 200	1	0.7	720	775

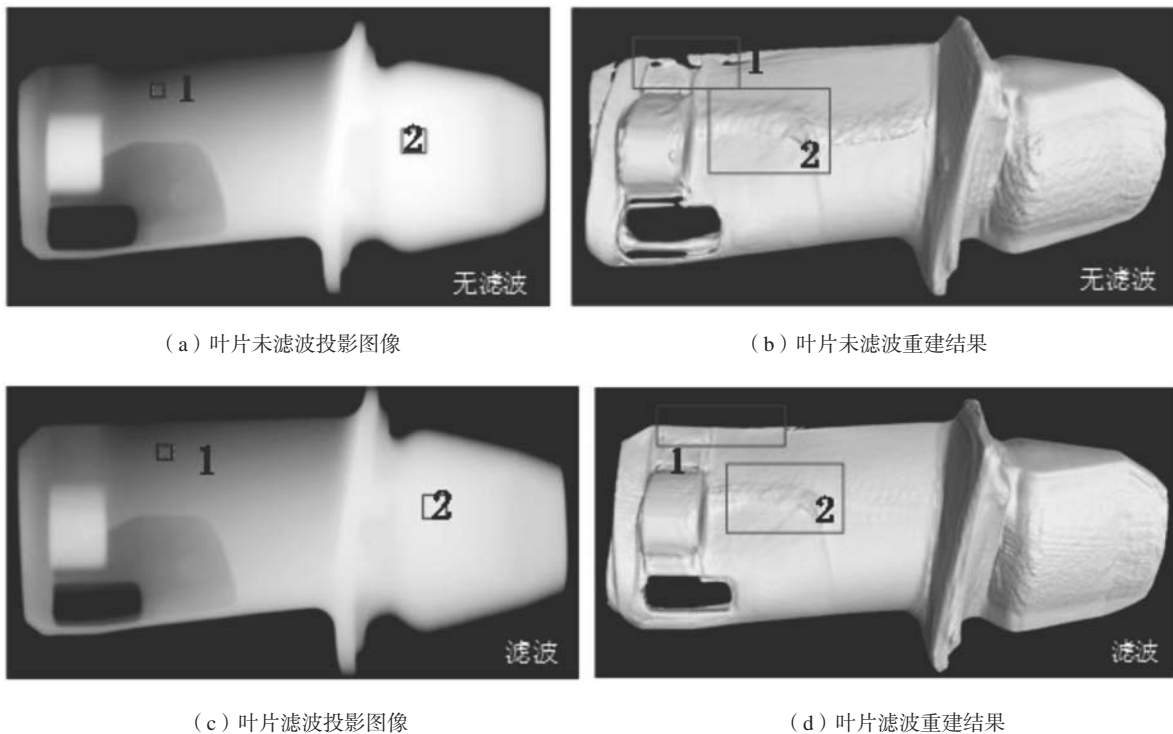


图4 有无滤波投影图像和重建结果对比
Fig. 4 Comparison of projected images and reconstruction results with filtered and unfiltered conditions

2.2.2 旋转轴倾斜校正对重建质量的影响

对于锥束CT系统的几何位置关系,理想条件下,射线源中心射线束应垂直于探测器成像矩阵的几何中心,转台旋转轴Z在探测器上的投影始终与探测器垂直方向的中心线重合。然而机械安装等多种因素导致的误差使射线源、转台、探测器实际位置关系与理想情况之间有所差异。这种误差在反投影重建的过程中将影响投影地址的计算,使被透照物体上某一点的投影经反投影后偏离该点的实际位置,从而出现了重影,环形伪影等现象。

以旋转轴倾斜误差为例,验证旋转轴倾斜校正对重建质量的影响。以试验2#的投影图像为数据基础进行了两次CT重建:第一次重建设置旋转轴倾斜校正值为 0° ,如图5a所示,在叶身后缘椭圆区域出现不规则结构。从垂直叶身方向的切片图像(图5c)上看,有明显重影;第二次重建中旋转轴倾斜校正值设置为 0.7° ,如图5b、d所示,重建结果中无明显重影。

试验2#的两次重建结果表明,该CT系统存在旋转轴倾斜误差,通过重建软件对倾斜误差进行校正可明显改善重建质量,减少重建伪影。旋转轴倾斜校正的角度值可通过软件校正算法自动计算获得,或通过实际测量后获得,但测量难度较大,也可以通过手动输入后观察切片预览图像来判断该值是否接近真实误差值,并选取一组数值中的某一个最佳值做为最终旋转轴倾斜校正值。

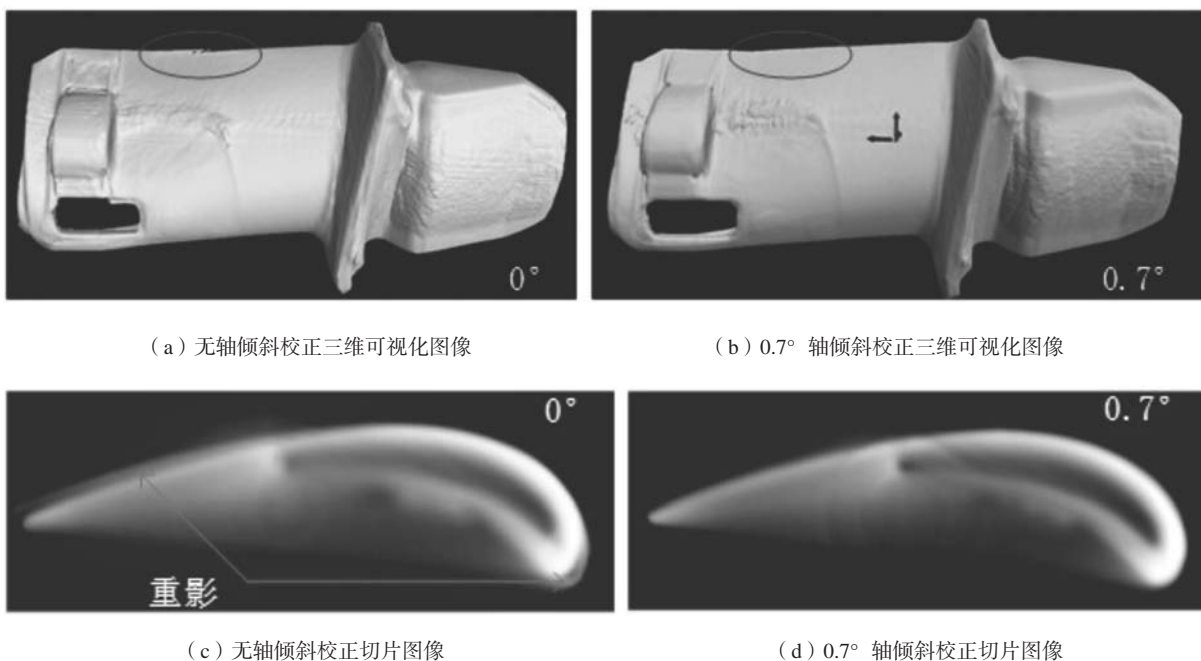
旋转轴倾斜对重建质量的影响还与投影图像的放大倍数相关联,增加投影图像放大倍数时,旋转轴的

倾斜误差在投影图像中也被放大,导致重建结果中叶片端部出现更加严重的重影。为验证存在旋转轴倾斜误差的情况下投影图像放大倍数对重建质量的影响,进行了对比试验2#和试验3#,试验2#中投影图像的放大倍数为1.32倍,试验3#中投影图像的放大倍数为2倍。对比试验中均设置旋转轴倾斜校正值为 0.7° 。图6所示为两次重建结果的三维可视化图像对比,两倍放大条件下,重建结果中存在严重的重影现象。

为排除旋转轴倾斜校正值设置不当引起在两倍放大时出现的重影,采用不同的旋转轴倾斜校正值对试验3#的投影数据进行多次CT重建,并通过观察叶身部位同一位置的切片图像来判断重影是否消除。图7所示为采用四个不同旋转轴倾斜校正值进行CT重建后的切片图像对比。从图中可以看出, 0.7° 已是该条件下的较优校正值,继续增大或减小校正值都会出现更明显的重影。结合上述理论分析和重建结果可推断,由于机械误差是多样的,当投影图像放大倍数增加时,这些误差也被放大,对重建结果的影响更加明显,仅通过旋转轴倾斜校正已经难以消除这些影响。高放大倍数对机械精度有更高的要求。

2.2.3 透照电压对重建结果的影响

管电压对CT重建质量的影响存在于相反的两个方面:一方面是管电压与散射之间的关系,当光子能量处于 $100 \sim 200 \text{ keV}$,且被透照物体的材料为镍时,由物体本身引起的散射主要来自康普顿效应,且康普顿散



(a) 无轴倾斜校正三维可视化图像

(b) 0.7° 轴倾斜校正三维可视化图像

(c) 无轴倾斜校正切片图像

(d) 0.7° 轴倾斜校正切片图像

图5 旋转轴倾斜校正重建结果对比

Fig. 5 Comparison of reconstruction results of rotation axis tilt correction and no rotation axis tilt correction

射截面随入射光子能量的增加而减小^[27]。因而提高管电压可减少由物体本身引起的散射。

另一方面是管电压与图像对比度之间的关系，降低管电压可提高投影图像对比度。式(1)为反投影重建算法的基本计算式。

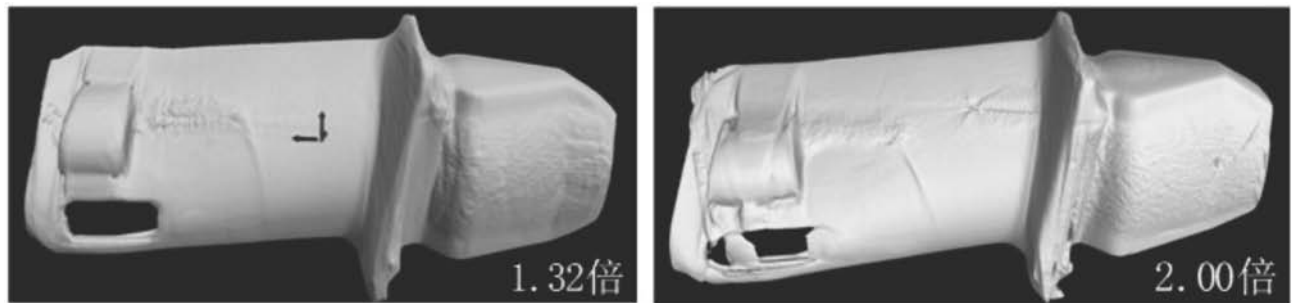
$$x_k = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} p_{k,i} \quad (1)$$

式中： x_k 表示反投影后切片图像上像素点 k 的值； n_p 为投影的数目； $p_{k,i}$ 为经过像素点 k 的第 i 条投影值。

从式(1)中可以看出， x_k 与 $p_{k,i}$ 为成正比关系，即当经过两个像素点的投影值相差较大时，经反投影之后

在切片图像中的对比度也将提高。因此，降低管电压能提高投影图像的对比度，从而能提高反投影重建后切片图像的对比度。

为了验证不同管电压下涡轮叶片CT重建的质量，进行了对比试验2[#]和4[#]，两次试验管电压分别为190 kV和150 kV，其他试验参数相同。图8所示为两次重建结果的三维可视化图像。采用150 kV管电压透照，重建结果的三维可视化图像具有更清晰和规则的表面轮廓，更接近真实物体形貌。试验结果表明，CT扫描管电压会对重建质量产生较大影响。

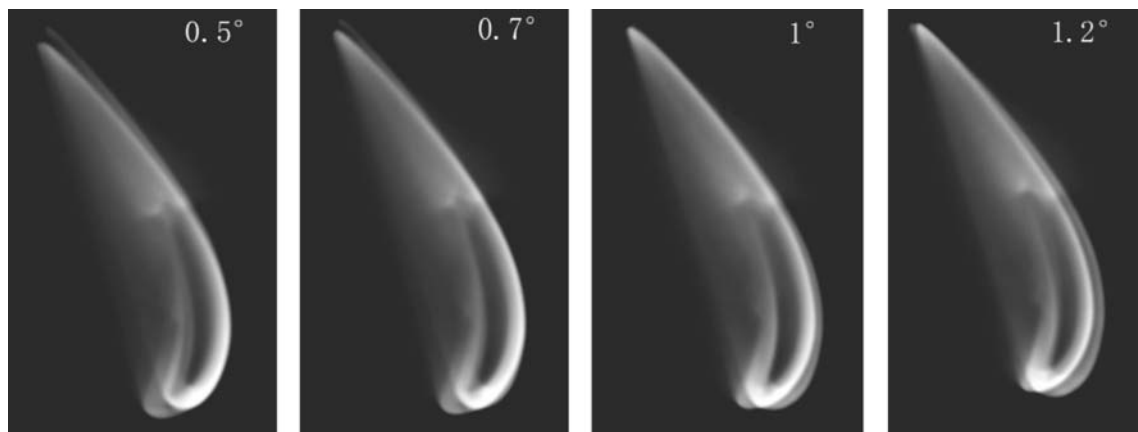


(a) 1.32倍放大投影重建结果

(b) 2倍放大投影重建结果

图6 不同放大倍数重建结果对比

Fig. 6 Comparison of reconstruction results under different magnifications



(a) 0.5° 校正

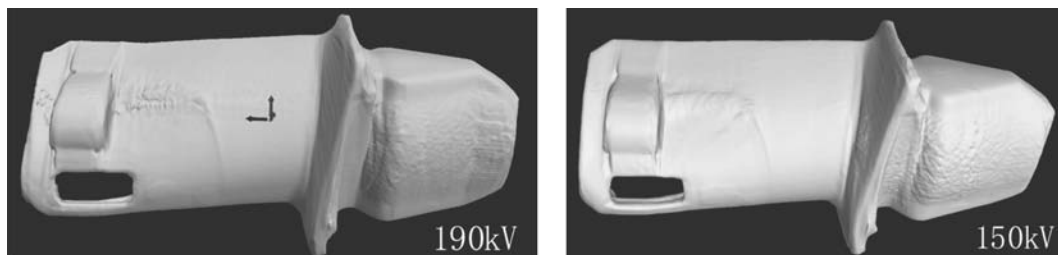
(b) 0.7° 校正

(c) 1° 校正

(d) 1.2° 校正

图7 不同旋转轴倾斜校正值得重建结果切片图像对比

Fig. 7 Comparison of tomogram obtained with different rotation axis tilt correction values



(a) 190 kV管电压透照重建结果

(b) 150 kV管电压透照重建结果

图8 不同管电压重建结果对比

Fig. 8 Comparison of reconstruction results with different tube voltages

2.2.4 投影图像数量对重建质量的影响

由反投影重建算法原理可知, 只有当投影数量 n 趋近于正无穷时反投影后得到的像素点的值才等于真实值, 投影数量越少时, 反投影后得到的像素点的值误差越大, 甚至在空间上原本投影值为0的点经反投影后得到了一个较大的像素值。以试验2[#]的投影图像为试验数据, 分别等间距的选取了72张、36张、18张和

9张投影进行CT重建, 重建结果如图9所示。从图中可以看出, 当投影数量为72张时, 叶片的外形结构基本完整。当投影数量为36张时, 叶片外形结构仍然可分辨, 但表面出现较多伪影。当投影数量为18张时, 叶片的结构变得残缺和模糊。当投影数量减少至9张时无法重建出叶片的结构形貌, 空间中反投影出了多条条状伪影。

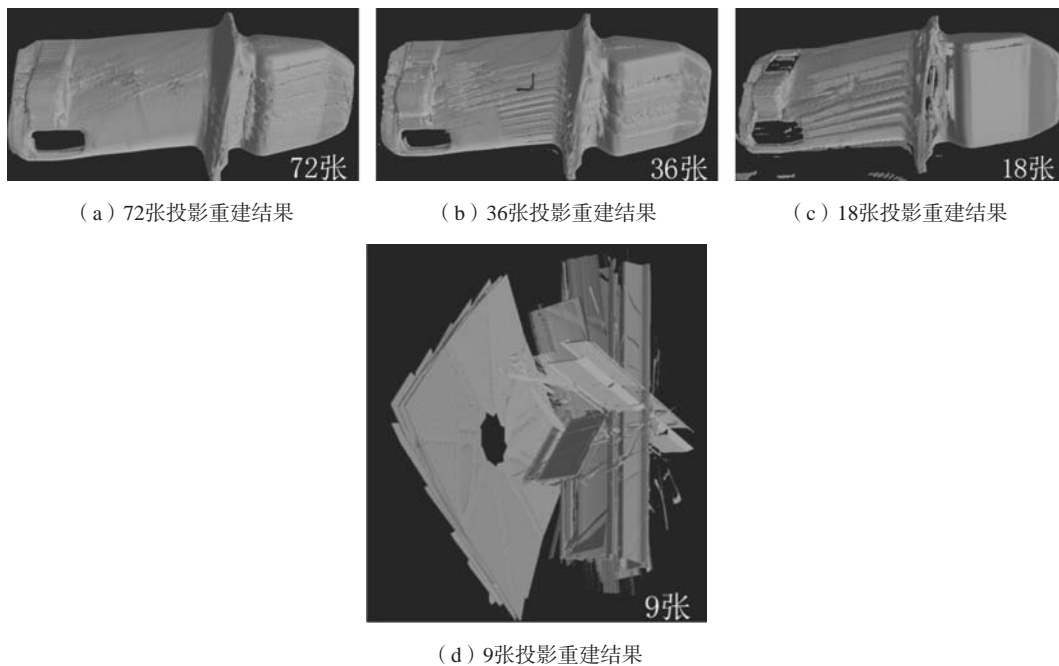


图9 投影数量对重建结果的影响

Fig. 9 Effect of the number of projections on the reconstruction results

3 结论

(1) 用铜滤波板对射线源进行滤波能够提高投影图像信噪比, 提高投影图像的厚度宽容度, 减少内切散射, 从而对改善重建质量有显著作用。

(2) 对投影图像进行旋转轴倾斜校正能有效降低旋转轴倾斜误差对重建质量的影响, 机械误差对重建质量的影响还与投影图像放大倍数相关联, 放大倍数越大时, 机械误差对重建质量影响越明显, 校正难度增大。

(3) 透照电压对重建质量的影响存在于相反的两个方面, 在一定电压范围内, 提高电压能减少物体本身引起的散射, 降低电压能提高图像对比度。

(4) 投影图像数量是影响重建质量的关键因素, 在硬件条件满足的情况下, 增加投影图像数量能够提高重建结果的准确性。

参考文献:

- [1] 张朝宗, 郭志平, 张朋, 等. 工业CT技术和原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 3-12.
- [2] CHIFFRE L D, CARMIGNATO S, KRUTH J P, et al. Industrial applications of computed tomography [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63: 655-677.
- [3] MATHEWS J P, CAMPBELL Q P, XU H, et al. A review of the application of X-ray computed tomography to the study of coal [J]. Fuel, 2017, 209: 10-24.
- [4] PLESSIS A D, BOSHOFF W P. A review of X-ray computed tomography of concrete and asphalt construction materials [J]. Construction and Building Materials, 2019, 199: 637-651.
- [5] 王增勇, 孙凯华, 代以春. ZL204合金疏松特征及成因分析 [J]. 铸造, 2017 (10): 53-56, 62.
- [6] 张定华, 黄魁东, 程云永. 锥束CT技术及其应用 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010, 12: 1-53.

- [7] VICRNTE M A, González D C, Mínguez J. Recent advances in the use of computed tomography in concrete technology and other engineering fields [J]. *Micron*, 2019, 118: 22–34.
- [8] O'BRIEN N S, BOARDMAN R P, SINCLAIR I, et al. Recent advances in x-ray cone-beam computed laminography [J]. *Journal of X-Ray Science and Technology*, 2016, 24 (5) : 691–707.
- [9] 王鹏, 张定华, 黄魁东, 等. 基于多核架构的锥束CT自适应快速重建技术 [C]//全国射线数字成像与ct新技术研讨会, 2012.
- [10] 张伟. 基于GPU加速的锥束CT重建算法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [11] 韩玉, 闫镇, 宇超群, 等. 锥束CT FDK重建算法的GPU并行实现 [J]. *计算机应用*, 2012, 32 (5) : 1407–1410.
- [12] 王丽芳. 基于平板探测器倾斜的锥束CT修正重建算法 [J]. *计算机工程与设计*, 2012, 33 (6) : 2363–2367.
- [13] 张俊, 闫镇, 李磊, 等. 锥束CT系统旋转平移轨迹几何参数标定方法 [J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25 (10) : 2693–2697.
- [14] KUMAR J, ATTRIDGE A, WOOD P K C, et al. Analysis of the effect of cone-beam geometry and test object configuration on the measurement accuracy of a computed tomography scanner used for dimensional measurement [J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22 (3) : 035105.
- [15] NIU T, ZHU L. Overview of X-ray scatter in cone-beam computed tomography and its correction methods [J]. *Current Medical Imaging Reviews*, 2010, 6 (2) : 82–89.
- [16] SHIH K L, JIN S C, CHEN J C. Developments of metal artifact reduction methods of cone-beam computed tomography [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2014, 9214 (3) : 319–326.
- [17] 《透平机械现代制造技术丛书》编委会. 叶片制造技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 1–11.
- [18] 敖波, 邬冠华, 邓翠贞, 等. 航空精密铸件射线CR成像检测研究 [J]. *铸造*, 2011 (9) : 65–68.
- [19] 刘晓光. 复杂空心定向涡轮叶片高强度型芯技术研究 [J]. *铸造*, 2015 (1) : 1–4.
- [20] 王小蒙, 王洪斌, 卢玉章, 等. 某型航空发动机单晶涡轮叶片热冲击疲劳行为研究 [J]. *铸造*, 2018, 67 (4) : 308–311.
- [21] 张祥春, 周言贤, 刘安, 等. 航空发动机涡轮叶片的三维检测 [J]. *无损检测*, 2017, 39 (8) : 34–40.
- [22] 韩玉, 尹召乐, 席晓琦, 等. 锥束CT在涡轮空心叶片残芯检测中的应用 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2019, 39 (3) : 297–299.
- [23] GAMEROS A, CHIFFRE L D, SILLER H R, et al. A reverse engineering methodology for nickel alloy turbine blades with internal features [J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2015 (9) : 116–124.
- [24] HE B Y, KATSAMENIS O L, MELLOR B G, et al. 3-D analysis of fatigue crack behaviour in a shot peened steam turbine blade material [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2015, 642: 91–103.
- [25] 程云勇, 张定华, 卜昆, 等. 基于工业CT测量数据的空心涡轮叶片三维壁厚分析 [J]. *机械强度*, 2009, 31 (5) : 791–796.
- [26] 刘元朋, 张丰收. 锥束计算机断层成像系统 [M]. 北京: 知识产权出版社, 2008: 1–91.
- [27] 张小海, 邬冠华. 射线检测 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013, 10: 58–77.

Optimization of Cone Beam CT Reconstruction Quality of Turbine Blade

GAO Xian-liang, GAO Hong-bo, CUI Kai-ge, ZHANG Shi-jing, WU Guan-hua, ZHANG Xiao-hai
(Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China)

Abstract:

This paper presents a self-developed X-ray cone beam CT detection system. By the use of the system, the CT scan and reconstruction were performed for a certain type of turbine blade sample, and the profile characteristics of the blade sample were demonstrated by three-dimensional visualization. In addition, the factors affecting the three-dimensional imaging quality, such as the tube voltage, the rotation axis tilt correction, the number of projections and the presence or absence of filter, are discussed. The study on the influence factors of CT reconstruction of turbine blade will help to expand the application of CT technology in the field of blade detection, including the analysis of blade profile deviation, the location and quantification of casting defects and the accurate measurement of blade wall thickness.

Key words:

turbine blade; cone beam CT; CT scan and reconstruction; three-dimensional visualization; nondestructive testing