

文章编号 1004-924X(2015)增-0000-06

板壳结构 X 射线计算机分层层析系统

胡新华*, 傅 健, 刘振中

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要:研制了基于工件倾斜回转扫描的计算机分层层析成像系统,用于实现长宽厚度比大的板壳结构工件的层析成像检测。描述了研制系统的组成,介绍了采用的 X 射线源、探测器以及倾角可调精密机械扫描装置等;然后,基于 X 射线与物质的相互作用原理,设计了工件倾斜回转层析扫描方式,分析了其工作原理,并对采用的基于代数迭代的图像重建算法和系统几何校准技术进行了讨论;最后,完成了系统调试,并以标准试件开展了系统性能测试和应用验证实验。实验结果表明:设计的系统层析成像空间分辨率达到 3 lp/mm;密度分辨力达到 0.3%,可满足板壳结构高精度分层层析成像要求。该系统在板壳层析检测方面优于传统的 CT 检测系统。

关键词:X 射线计算机层析检测(CT);图像重建;板壳结构;空间分辨率;密度分辨力

中图分类号:TH878.1;TG115.281 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0000

X-ray computed laminographic system for plates and shells

HU Xin-hua*, FU Jian, LIU Zhen-zhong

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

* Corresponding author, E-mail: arthurhu@139.com

Abstract: A Computed Laminography (CL) imaging system was developed based on the rotation scanning of tilted objects to realize tomographic imaging inspection of plates and shells. The system structure was outlined and the adopted X-ray source, detector and mechanical system were described. Then, according to the X-ray with matter interaction principle, the rotation laminography scanning mode based on tilted objects was designed and its operation mechanism was analyzed. Furthermore, the algebraic iterative reconstruction algorithm and system geometric calibration method were discussed. Finally, the system was adjusted and the performance testing and the application experiments were carried out. Experimental results indicate that the imaging spatial resolution of the developed system reaches 3 lp/mm and the density resolution is 0.3%. It satisfies the high-precision tomographic imaging inspection requirements of plates and shells and the laminographic testing performance for plates and shells is superior to that of traditional TC method.

Key words: X-ray Computed Laminography (CL); image reconstruction; plate and shell; spatial resolution; density resolution

收稿日期:2015-06-18;修订日期:2015-07-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11179009, U1432101);北京市自然科学基金资助项目(No. 7152088);教育部新世纪优秀人才计划资助项目(No. NCET-13-0022);北京市科技新星计划资助项目(No. 2009A09)

1 序 言

随着航空、航天、船舶工业等领域高技术装备的快速发展,越来越多性能优异的薄壁板状构件或技术单元得到了应用,例如碳纤维增强复合材料层压板、多层印刷电路板(Printing Circuit Board, PCB)等。这类材料有一个共同特点就是长宽与厚度比偏大,称之为薄壁板状构件。

常规的无损检测方法均存在技术局限性,难以实现薄壁板壳构件内部结构、材料异常和缺陷的检测、故障的诊断以及内部结构形态的定量分析。对缺陷和损伤的形成与演化过程缺乏有效的观测手段与表征方法,导致薄壁板壳构件损伤研究与失效分析较为滞后。为此,急需开发专门针对薄壁板壳构件的检测手段,实现板材结构和损伤的无损观测与表征。

工业计算机层析成像(Industrial Computed Tomography, ICT)是一种先进的非接触式检测技术^[1-5]。它采用 X 射线对被检测对象做周向回转扫描,以重建算法根据探测器采集的射线透射图像序列重构物体被扫描区域的层析图像,无损地全息再现构件内部的几何和物理形态,是目前公认的构件内部结构、材料损伤的最佳检测手段之一,在高技术装备研制、生产和使用过程中得到了越来越广泛的应用。然而,受成像视场和探测器动态范围的影响,工业 CT 难以对大尺寸薄壁板状构件实施有效的层析检测。为此,多种 CT 改进技术被开发,如半覆盖扫描、摆动层析、合成层析及大视场层析等。其中,半覆盖扫描方法在长物体检测上应用比较广泛;摆动层析成像具有扫描速度快、算法简单、实时性高等特点,适合于多层大面积复合材料以及多层电路板的快速成像检测;合成层析根据有限角度投影数据重建三维物体,射线剂量小。这些方法一定程度上扩大了 CT 成像视场,但因受到成像原理和硬件的制约而具有局限性,难以从根本上解决大尺寸板壳构件层析检测的问题。

本文开发了一套针对板壳结构的 X 射线计算机分层层析(Computed Laminography, CL)检测系统^[6]。与传统的工业 CT 相比,CL 采用锥束射线倾斜入射板状构件的扫描方式,避免了传统 CT

检测中视场受限和动态范围过大的问题。

2 系统描述

CL 系统主要由 X 射线源、探测器、机械扫描装置、数采控制计算机以及软件系统等部分构成,如图 1 所示。

系统依据 X 射线与物质相互作用的原理工作。当实施层析扫描时,工件首先相对主射线入射方向倾斜一个角度。随后,转台带动工件在系统集成软件控制下做 360°周向回转。在每个旋转角度,X 射线源在系统集成软件控制下,发射锥束 X 射线对工件实施透照。放置于工件后面的探测器将被工件衰减后的 X 射线转换成电信号输出,形成二维投影图像序列。最后,利用代数迭代重建算法从采集到的投影数据中重建出物体层析图像,实现其内部结构的无损表征。

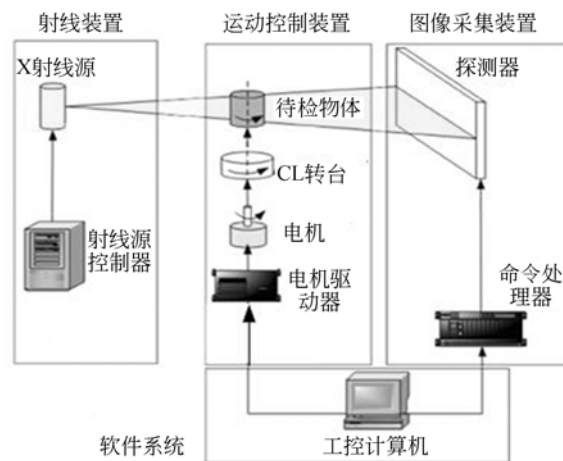


图 1 CL 检测系统构成图

Fig. 1 Constitution of CL system

2.1 X 射线装置

本系统采用德国 YXLON 公司的 MG320X 射线装置,主要包括 X 射线管、高压源、控制器、水冷却系统、通风系统及射线防护系统。其中,控制器主要用于控制射线的发射和关闭;水冷却系统用于 X 射线机工作过程中的散热,确保射线机的安全使用;通风系统及防护系统主要用于保证工作环境的安全性。

2.2 图像采集装置

CL 系统采用美国 VARIAN 公司的 Pxa-

can2520 探测器,它主要包括面阵接收器、图像采集卡和命令处理器 3 部分。该探测器探元尺寸为 0.127 mm,像素矩阵为 1 920 × 1 536。在系统研制过程中,利用其附带的库函数进行了接口二次开发,通过 BitFlow 图像采集卡获取和高速传输被检物体在回转扫描时产生的二维投影图像序列。

2.3 机械装置

CL 系统的机械装置采用立式结构,主要包括基座、探测器、射线源支架、转台、电机及系统控制柜等部分。为方便调试,转台具有俯仰、左右、前后平移等自由度。考虑到成本因素,除旋转扫描运动外,其余自由度运动通过人工控制机械结构实现。旋转电机采用日本横河公司的 DM1B 伺服电机及其 DRVG III 驱动器,通过 OEMAT6400 运动控制卡进行扫描运动控制。控制卡将上位机运动控制指令发给驱动器,驱动器控制伺服电机按照给定方式驱动转台运动,并将运动的位置信息反馈给伺服电机驱动器,修正电机的运动。驱动器与电机之间形成以位置信息为反馈的闭环控制系统,以确保系统的运动精度。

2.4 采集控制主机以及软件

CL 系统采用研华工控机作为数据采集控制计算机,操作系统为 Windows2000。采集软件由 Visual C++ 6.0 开发,通过接口函数按设定时序来实现 X 射线机、探测器、电机三者间的协调工作,完成系统扫描和数据采集。

3 扫描方式

本文采用的 CL 扫描方式如图 2(a) 所示。在该扫描方式下,X 射线相对于构件长宽表面法线倾斜入射,构件绕旋转轴等角步长回转,以在厚度方向上采集的二维数字图像序列重构扫描区域的断层图像。图 2(b) 为传统的 CT 扫描方式。对比图 2(a) 和 (b) 可知,CL 是 CT 扫描技术的一种扩展。当 CL 工件的倾斜角度为 90° 时,即为传统 CT 扫描方式。

传统 CT 应用于板壳检测时,将面临两个突出问题。首先是扫描过程中物体沿射线路径方向透照厚度变化大的问题,如图 2(c) 和 (d) 所示。在图 2(c) 情况下,物体透照厚度小,射线强度急剧减少,投影数据噪声小,质量好。但当物体旋转

90° 后,物体透照厚度迅速变为最大,射线强度急剧衰减,以致难以探测到有效的射线信号,使得后续的图像重建难以进行,如图 2(d) 所示。其次,当构件尺寸比较大时,旋转过程中可能存在碰撞射线源或者探测器的问题。CL 扫描方式在旋转扫描前对构件进行了倾斜放置,降低了透照厚度和回转半径,从而解决了上述两个问题,使扫描不受被检测板壳长、宽尺寸的限制,实现了板壳结构的扫描层析成像。

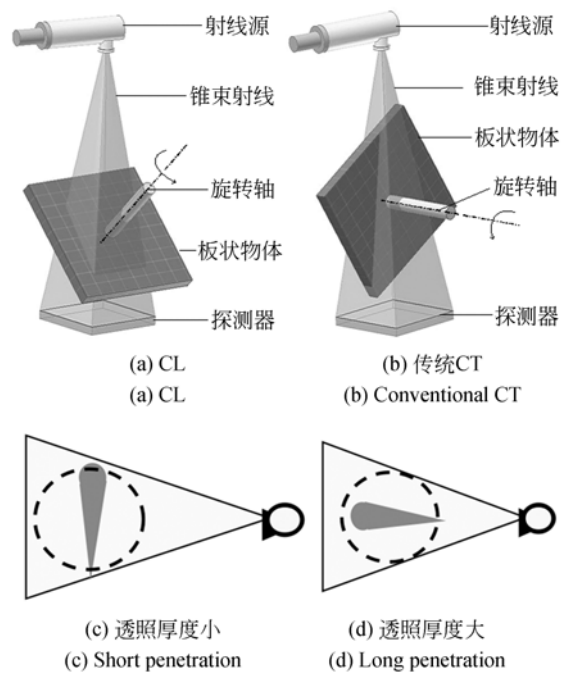


图 2 CT 与 CL 成像扫描方式比较

Fig. 2 Comparison between CT and CL imaging scanning modes

4 图像采集

图像采集系统的设计关键在于它和运动控制系统的匹配,即转台的旋转与投影数据的采集匹配。系统工作时序如图 3 所示。首先,计算机控制探测器完成一次数据采集;随后,发送运动指令到运动控制器,控制转台旋转某一设定的固定角度(角步长);等转台停止转动时,计算机再次采集投影数据;依此类推,直至完成 360° 采样角度。

探测器采集数据时高电平有效。高电平持续时间 $\Delta t_1 = N/f$ (N 为图像叠加帧数, f 为采样频率)。图像采集结束,探测器采集时序的高电平

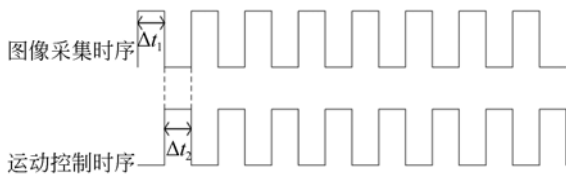


图3 采集和运动时序图

Fig. 3 Acquire and move sequence chart

调变为低电平,下降沿触发运动控制时序由低电平跳变为高电平,电机运动到下一位置。经过 $\Delta t_2 = \varphi/v$ (φ 为设定的脚步长, v 为电机的设定速度),探测器到达指定位置后开始新的数据采集。 Δt_1 和 Δt_2 根据设定值的不同而改变,所以时序方波并不一定对称,周期 $T = \Delta t_1 + \Delta t_2$ 。

5 系统校准

在系统搭建过程中,为了保证采集到的数据符合重建算法的要求,系统需要进行调整并校准。校准主要分为几何校准和探测器校准。

5.1 几何校准

实际扫描过程中,成像系统的投影旋转中心不一定与探测器中心重合,其误差将引起 CT 图像伪影,故需要对其进行几何校准。本系统几何校准采用了文献[2]的方法。首先,设定合适阈值对扫描得到的正弦图进行二值化分割;然后,根据分割结果计算这些投影地址的均值,获得投影旋转中心的坐标;最后,在重建算法里根据这个坐标做投影修正,重建图像。

5.2 探测器校准

本系统采用的平板探测器探元高达数百万。每个探元的工作特性不可能完全一致,加上成像过程各种噪声的影响,成像系统生成的原始图像质量并不能满足实际检测的要求。因此,对探测器采集的原始数据进行校正是实际检测过程一个必不可少的环节。

本文采用多帧叠加取平均的方法来抑制系统采集过程中的随机噪声。根据厂商提供的坏像素地图,辅以主观判定确定位置后,以周边探元均值来校正探测器坏探元。以剪影操作从亮场图像中去除无输入形成的探测器暗电流误差。探元间响

应不一致性利用公式(1)^[7]进行校正:

$$I_c(x, y) = c \frac{I_r(x, y) - I_d(x, y)}{I_f(x, y) - I_d(x, y)}, \quad (1)$$

其中: I_r 为输出的原图图像, I_d 为暗场图像, I_f 为亮场图像, I_c 为修正后的图像, c 为 $I_f(x, y) - I_d(x, y)$ 的像素均值。

6 图像重建算法

CT 图像重建算法可分为解析法^[8]和迭代法^[8]两大类。其中,解析法又分为直接傅里叶变换法和滤波反投影法。该方法重建质量好、速度快,因而在目前工业 CT 图像重建中得到了广泛应用。然而,在缺失投影数据的情况下,解析法将产生大量重建伪影,难以获得高质量的重建结果。迭代法的特点则与解析法相反,虽然重建速度慢,但对数据完备性要求较低,抗噪性能更强,特别适用于投影数据缺失的情况。随着计算机硬件的飞速发展,迭代法的重建速度得到了极大提高^[9],并在近年开始得到普及。

由于 CL 本质上是一种非精确的局部成像技术,存在数据缺失,因此,本系统采用迭代法中的代数迭代^[8-11] (Algebraic Reconstruction Technique, ART)重建算法重建图像。该算法对射线逐条进行迭代重建,在每条射线下修正对投影值有贡献的像素。算法如公式(2)所示:

$$x^{(k+1)} = \begin{cases} x^{(k)}, & r_{ik}^T x^{(k)} \leq p_{ik} \\ x^{(k)} + \lambda^{(k)} \cdot \frac{p_{ik} - r_{ik}^T x^{(k)}}{\|r_{ik}\|^2}, & \text{其他} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: k 代表迭代次数, λ 代表松弛因子, $x^{(0)}$ 为初始估计值。松弛因子 λ 一般取 $0 < \lambda \leq 1.0$ 。算法流程如下:(1)对第 i 条射线进行修正重建后,立即更新图像,并将更新后的图像作为第 $i+1$ 次迭代时的初始图像,直到执行完所有射线投影,完成一次完整迭代;(2)判断重建图像是否收敛到一定标准,如果没有则再进行下一次迭代,直到达到一定收敛标准或达到一定迭代次数,将最后更新的图像作为迭代算法的最终重建图像。

7 实验结果

7.1 系统评估

图 4 为开发形成的 CL 系统,图中转台处于水平位置,倾角为 90°。系统置于封闭嵌有铅板

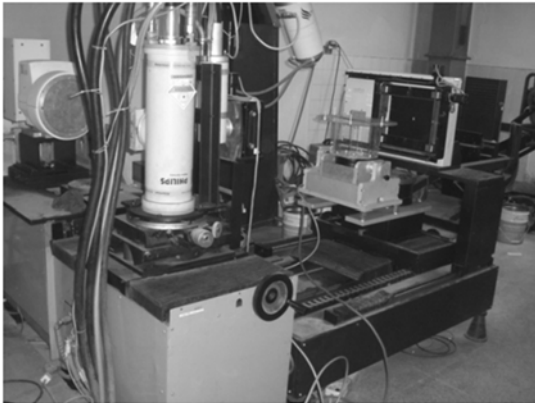
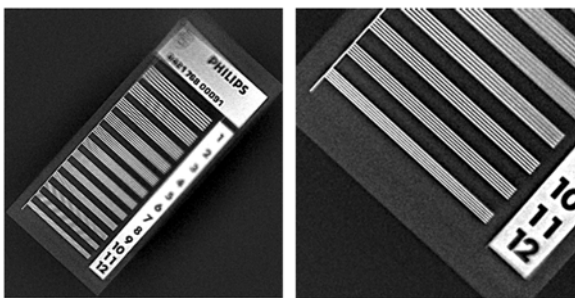


图 4 CL 硬件系统图

Fig. 4 CL hardware system

的房间内,防止射线泄露,系统控制平台位于操作室。使用 PHILIPS 测试卡对系统空间分辨率和密度分辨率进行了测试。空间分辨率直接通过读取 PHILIPS 测试卡 CL 图像可分辨特征对应的线对数;密度分辨率以国军标 GJB3212-2004 推荐的方法,按标准规定的 CDF 曲线计算方法测定。空间分辨率测试结果如图 5 所示,可分辨特征为第 12 组,对应的分辨率为 3 lp/mm。密度分辨率测试结果如图 6 所示,可分辨密度差为 0.3%。



(a)空间分辨率测试图像 (b)局部放大图
(a)CL slice for spatial resolution (b)Elargement of interest region

图 5 空间分辨率测试

Fig. 5 Testing result of spatial resolution

7.2 应用实验

以如图 7(a)所示的 CPU 芯片为典型薄壁板状构件样品,利用开发的 CL 系统对它进行了分层层析实验。成像结果如图 7(b)所示,可清晰观察到针脚、芯片、焊点及其空间位置分布,验证了所研制系统的有效性。

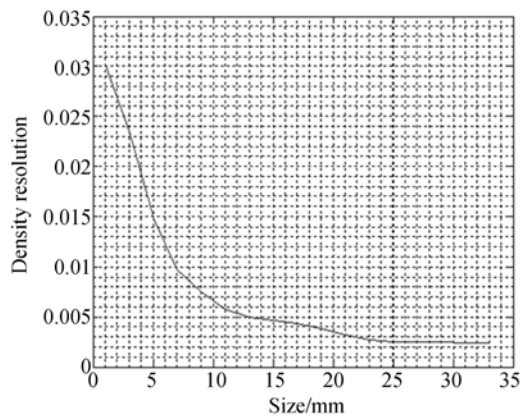
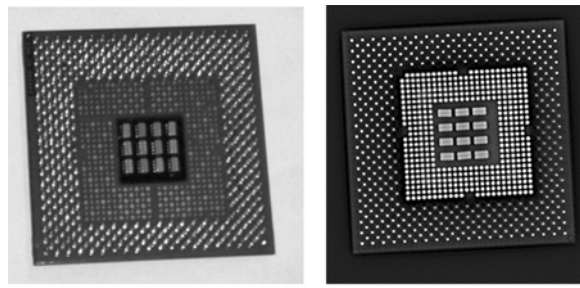


图 6 密度分辨率测试结果

Fig. 6 Testing result of density resolution



(a)CPU实物图 (b)CPU重建断层图像
(a)Picture of CPU (b)CL slice of CPU

图 7 CPU 实物图和重建图像

Fig. 7 CPU sample and reconstructed image

8 结 论

本文研制了一套针对薄壁板状构件的 X 射线计算机分层层析检测系统,对其系统设计、关键软、硬件及系统性能测试等进行了分析。该系统在板壳层析检测方面的性能显著优于传统 CT。同时针对系统成像扫描方式及该平板探测器的成像特点,设计了系统数据采集控制时序,对数据采集参数进行了优化,并对系统的几何参数和探测器进行了校正。性能测试结果表明,系统密度的分辨率优于 0.3%,空间分辨率优于 3 lp/mm,可满足板壳结构高分辨率层析成像的检测要求。

参考文献:

[1] 邹晓兵,曾理. 锥束螺旋 CT 半覆盖扫描重建[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 434-442.

- ZOU X B, ZENG L. Half-cover scanning and reconstructing for helical cone-beam CT[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 434-442. (in Chinese)
- [2] 李保磊,张耀军. X 射线 CT 系统投影旋转中心的测量[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 967-971.
LI B L, ZHANG Y J. Measurement of center of rotation for projection in X-ray computed tomographic system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 967-971. (in Chinese)
- [3] 张峰,江桦,闫镔,等. 锥束 CT 圆轨迹半覆盖扫描的几何校正[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(7): 1659-1665.
ZHANG F, JIANG H, YAN B, *et al.*. Geometric calibration for half-cover scanning in circular cone-beam CT[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1659-1665. (in Chinese)
- [4] 周凌宏,李翰威,徐圆,等. 锥束 CT 圆轨道扫描的几何校正[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(10): 2847-2854.
ZHOU L H, LI H W, XU Y, *et al.*. Geometry calibration for circular trajectory scanning in cone-beam CT[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(10): 2847-2854. (in Chinese)
- [5] FU J, HU X H, LI C. X-ray differential phase-contrast tomographic reconstruction with a phase line integral retrieval filter [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2015, 778: 14-19.
- [6] FU J, JIANG B H, LI B. Large field of view computed laminography with the asymmetric rotational scanning geometry [J]. *Science China - Technological Sciences*, 2010, 53(8): 2261-2271.
- [7] 李昊,郭晓莲,唐智伟,等. 基于 X 射线的小动物成像 micro-CT 系统[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2009, 49(6): 900-903.
LI H, GUO X L, TANG ZH W, *et al.*. X-ray micro-CT system for small animal imaging[J]. *J. Tsinghua Univ. :Sci. & Tech.*, 2009, 49(6): 900-903. (in Chinese)
- [8] 庄天戈. CT 原理与算法[M]. 上海:上海交通大学出版社, 1992.
ZHUANG T G. *CT Principle and Algorithms* [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1992. (in Chinese)
- [9] HARASSE S, YASHIRO W, MOMOSE A. Iterative reconstruction in x-ray computed laminography from differential phase measurements [J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16560-16573.
- [10] FU J, TAN R B, CHEN L Y. Analysis and accurate reconstruction of incomplete data in X-ray differential phase-contrast computed tomography [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2014, 406(3): 897-904.
- [11] FU J, HU X H, VELROYEN A, *et al.*. 3D algebraic iterative reconstruction for cone-beam X-ray differential phase-contrast computed tomography[J]. *Plos One*, 2015, 10(3): e0117502.

作者简介:



胡新华(1989-),男,江西修水人,2013年于北京航空航天大学获得学士学位,主要从事 X 射线分层析成像(X-CL)数理基础的研究。E-mail: arthurhu@139.com

导师简介:



傅健(1976-),男,四川自贡人,副教授,硕士生导师,1999年、2004年于北京航空航天大学分别获得学士、博士学位,现为北京航空航天大学机械工程及自动化学院数字辐射成像技术研究中心主任,主要从事 X 射线、中子波动光学理论与应用技术方面的研究。E-mail: fujian706@buaa.edu.cn