

工业 CT 技术进展及应用

王增勇, 汤光平, 李建文, 孙朝明

(中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 绵阳 621900)

摘 要:介绍了工业 CT 系统的技术原理, 发展近况, 尤其是国内在重建算法和应用软件方面的进展情况。同时介绍了高能工业 CT 的研究现状, 比较了国内外高能工业 CT 的技术指标。结合工业 CT 技术在精密焊接结构件、密度分布表征和装配质量检测以及逆向工程方面的典型应用, 对工业 CT, 尤其是高能工业 CT 技术的可能应用方向作了一定的展望。

关键词:工业 CT; 图像; 应用

中图分类号: TG115. 28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2010)07-0504-05

Development and Application of Industrial CT

WANG Zeng-Yong, TANG Guang-Ping, LI Jian-Wen, SUN Chao-Ming

(Institute of Mechanical Manufacturing Technology, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The technical method and recent development of industrial computed tomography (CT) were introduced briefly, especially in the research and development status about reconstruction arithmetic and internet applications in domestic. At the same time the research state of high energy industrial CT was introduced and its technical data in domestic and overseas companies was compared. It also introduced particularized application of industrial CT in precise weld seam structure, density distributing characterization, assemble quality and converse engineering, and so on. Then the applied direction of industrial CT especially high energy industrial CT was expected.

Keywords: Industrial CT; Image; Application

工业 CT 技术是工业计算机断层扫描成像(Industrial Computed Tomography)技术的简称, 1917 年由 Randon J 提出, 但直到 1970 年中后期才开始大量应用于无损检测。近年来, 随着计算机科学的进步及探测器技术的发展, 工业 CT 的性能逐年提高, 目前工业 CT 作为一种实用化的无损检测手段, 正逐渐从满足一般工业应用的低能工业 CT, 向满足大型复杂结构件检测需求的高能工业 CT 技术发展。广泛应用于航空航天、核能、军事等多种领域, 以及在制造业的无损测绘与分层设计制造等方面。

1 工业 CT 技术原理及特点

收稿日期: 2009-05-26

作者简介: 王增勇(1971—), 男, 高级工程师, 主要从事材料和构件的无损检测技术和工艺研究。

1.1 工业 CT 技术原理

工业 CT 是在射线检测的基础上发展起来的, 其基本原理是当经过准直且能量为 I_0 的射线束穿过被检物时, 根据各个透射方向上各体积元的衰减系数 μ_i 不同, 探测器接收到的透射能量 I 也不同。按照一定的图像重建算法, 即可获得被检工件截面一薄层无影像重叠的断层扫描图像(图 1), 重复上述过程又可获得一个新的断层图像, 当测得足够多的二维断层图像就可重建出三维图像。

当单能射线束穿过非均匀物质后, 其衰减遵从比尔定律^[1]:

$$I = I_0 e^{-\left(\sum_{i=1}^n \mu_i\right) \chi} \quad (1)$$

$$\text{即} \quad \frac{\ln \frac{I_0}{I}}{\chi} = (\mu_1 + \mu_2 + \cdots + \mu_i) \quad (2)$$

式中 I, I_0 为已知量, 未知量为 μ_i 。一幅 $M \times N$ 个

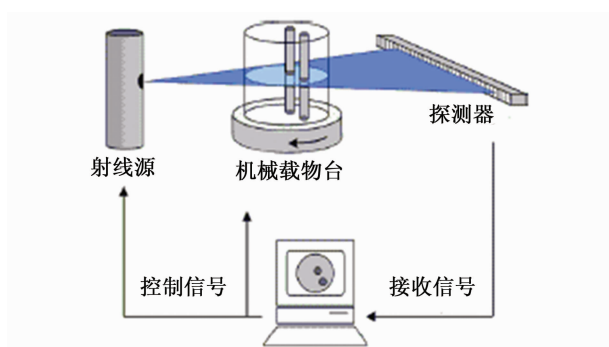


图1 工业CT结构工作原理

像素组成的图像,必须有 $M \times N$ 个独立的方程才能解出衰减系数矩阵内每一点的 μ_i 值。当射线从各个方向透射被检物体,通过扫描探测器可得到 $M \times N$ 个射线计数和 I 值,按照一定的图像重建算法,即可重建出 $M \times N$ 个 μ 值组成的二维 CT 灰度图像。

1.2 工业CT技术特点

从本质上讲,工业CT是一种射线检测技术,与常规射线检测技术相比,主要优点有^[2]:

(1) 工业CT图像目标不受周围细节特征的遮挡,可直接获得目标特征的空间位置、形状及尺寸信息。

(2) 工业CT具有突出的密度分辨能力,高质量的CT图像密度分辨率可达0.1%甚至更高。

(3) 工业CT图像是数字化的结果,图像便于存储、传输、分析和处理。

2 工业CT部件的发展现状

2.1 辐射源^[3]

射线源常用X射线机和直线加速器。X射线机的峰值能量范围从数十到450 keV,且射线能量和强度都是可调的;直线加速器的射线能量一般不可调,常用的峰值射线能量范围在1~16 MeV。其共同优点是切断电源以后就不再产生射线,焦点尺寸可做到微米量级。

2.2 探测器^[3]

目前常用的探测器主要有高分辨CMOS半导体芯片、平板探测器和闪烁探测器三种类型。半导体芯片具有最小的像素尺寸和最大的探测单元数,像素尺寸可小到10 μm 左右。平板探测器通常用表面覆盖数百微米的闪烁晶体(如CsI)的非晶态硅或非晶态硒做成,像素尺寸约127 μm ,其图像质量接近于胶片照相。闪烁探测器的优点是探测效率高,尤其在高能条件下,它可以达到16~20 bit的动

态范围,且读出速度在微秒量级。其主要缺点是像素尺寸较大,其相邻间隔(节距)一般 $\geq 0.1 \text{ mm}$ 。

2.3 样品扫描系统^[3]

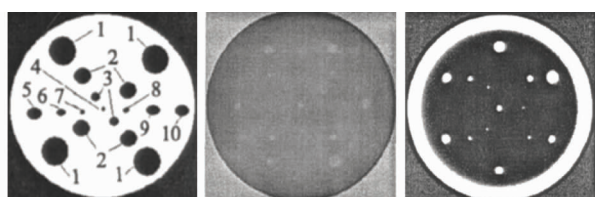
样品扫描系统从本质上说是一个位置数据采集系统。工业CT常用的扫描方式是平移-旋转(TR)方式和只旋转(RO)方式两种。RO扫描方式射线利用效率较高,成像速度较快。但TR扫描方式的伪像水平远低于RO扫描方式,且可以根据样品大小方便地改变扫描参数(采样数据密度和扫描范围)。特别是检测大尺寸样品时其优越性更加明显,源-探测器距离可以较小,以提高信号幅度等。

2.4 重建算法

计算机软件无疑是CT的核心技术,当数据采集完成以后,CT图像的质量已经基本确定,计算机软件的好坏就直接影响到图像的重建质量。CT图像重建通常采用卷积反投影法,其优点是图像质量高,易于用硬件设计为专用图像处理机,缺点是只能形成某一断面上的二维灰度信息,不能得到被检测物的整体描述。为提高缺陷判别的准确性,Kudo H研究了Smith和Grangeat的三维投影重建算法的优点,提出了Smith-Grangeat方法,该方法得到的图像依然会有明显的衰减和失真。马存宝通过增加窗函数和平滑滤波的方法,对Smith-Grangeat方法进行修正,得到了较好的重建图像^[4]。

在大尺寸构件检测方面,针对RO扫描只能检测小尺寸构件,而TR扫描大尺寸构件耗时较长的难题,魏东波^[5]提出了一种通过检台二次偏置扩大扫描视场的工业CT成像方法,并基于三代工业CT投影数据存在的冗余特征,推导了它的投影数据重排预处理方法和滤波反投影(FilterBack Projection,FBP)重建算法,实现了在增加一次360°回转扫描情况下,其有效扫描视野达到标准三代工业CT方法的2.8倍左右。且该方法仅需CT扫描台具备平移和旋转自由度,易于与现有三代工业CT兼容,工程实现方便。

针对CT成像系统中,面阵探测器成像过程相对线阵探测器而言系统散射影响大,动态范围小,成像指标远低于线阵探测器的问题,王黎明^[6]研究采用大探测器方法重组像元,用亚像素高分辨率方法重组和补偿数据,同时改变数据获取方法,通过机械系统的精确移动,在大探测器数据间进行精确插值,弥补了面阵探测器在动态范围的不足,得到了较好的CT重建结果,见图2。



(a) 原始图像 (b) 直接重建结果 (c) 新方法重建结果

图 2 实际重建结果对比

在算法的具体应用上,杨莞^[7]针对球形封闭体内外球面轮廓度的检测,提出了一种精确测量方法,即在获得球体样件 CT 断层图像的基础上,利用 CT 插值方式提取球体样件的轮廓线边界系列 CT 值,再根据二次曲线逐次逼近拟合获得其圆心坐标及平均半径,其测量精度达到 0.05 mm。王珏^[8]针对较小的同批、同型号工件进行检测,提出了一种基于弧半径投影的多目标图像搜索方法,即将多个小型工件放在转台同一圆环带上一同扫描,在目标区域利用 Zernike 矩进行精确识别,在减少识别耗时的同时,提高了 CT 图像识别方法的有效性和实用性,见图 3。



(a) 工件有效圆环区域图 (b) 弧半径投影结果图 (c) 改进的弧半径投影结果图

图 3 基于弧半径投影的多目标图像识别

3 高能工业 CT 研究

3.1 国外现状

美国是工业 CT 技术研究及设备研制最先进的国家。1995 年 ARACOR 公司生产的 15 MeV 直线加速器 ICT2500 型 CT 系统,能够对直径 2.5 m 的固体火箭发动机进行 CT 重建,图 4 是对 2 m 直径固体火箭发动机重建的 CT 切片^[9]。

3.2 国内现状

国内方面,北京自动化所、华北工学院等机构均开展过高能 CT 研究^[9],目前清华大学已经将高能 CT 产品系列化,包括 2/4/6/9/15 MeV 工业 CT 系统,技术达到国际先进水平^[10]。湖北三江航天集团^[11]采用 9 MeV 高能工业 CT,对火箭发动机产品中检测到的最小裂纹为 0.1 mm×5 mm×10 mm,



图 4 ICT2500 重建的火箭发动机 CT 切片

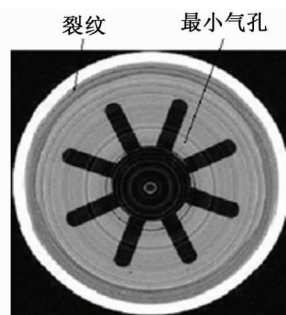


图 5 火箭发动机药柱裂纹及气孔检测 CT 图像

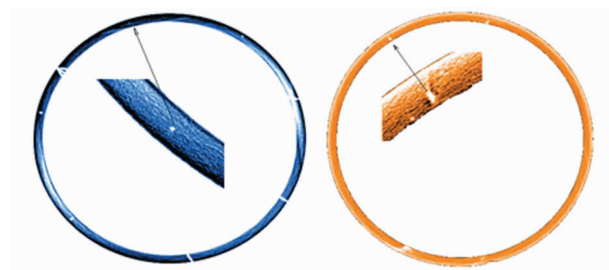
检测到的最小气孔为 $\phi 2$ mm,如图 5 所示。

中国工程物理研究院中物仪器公司从 1994 年就开始了工业 CT 的研制工作,目前已成功研制出 420 keV X 光机和 2/9MeV 加速器工业 CT 系统,该系统采用独有的亚像元成像技术和小间隙测量技术,成像时间短,参数调整方便。在高能射线源的使用上,采用了自主研发、拥有国家发明专利的新型结构驻波加速管(专利号 03135490.4),在缩短了加速管结构长度的同时,可获得 1.4 mm 的小焦点。其主要技术指标对比见表 1^[12]。

4 典型应用

4.1 精密焊接结构件的焊接缺陷工业 CT 检测

对某尺寸约 $\phi 85$ mm×3.5 mm 的圆环电子束焊缝,采用 420 kV 工业 CT 系统,检测结果见图 6,图中小至 $\phi 0.1$ mm 的孔以及 0.1 mm 宽的裂纹皆



(a) 焊前的预制缺陷 (b) 焊接后

图 6 试样工业 CT 结果图

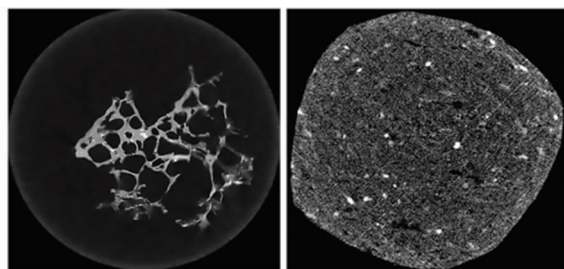
表 1 国内外典型公司同类产品性能指标比较

代表公司	射线类型	能量范围	焦点大小/mm	最高空间分辨率/ μm	相对密度分辨率/%	探测器类型	典型检测时间/min
BIR/ARACOR	X, γ	100kV~30MeV	2.0	25	0.5	线阵	2~5
俄工业探伤公司	X	100kV~1.93MeV	—	25	1.0	线阵	3~10
重大高科	X, γ	100kV~1.33MeV	—	25	0.5	线阵	2~10
清华大学	X, γ	100kV~15MeV	—	25	0.5	线阵	2~10
中物仪器	X	100kV~15MeV	≤ 1.5	20	0.8	线阵/面阵	0.5~1

清晰可辨。图 6(a)中心部分为对 $\phi 0.1 \text{ mm}$ 孔作局部扫描的 CT 图像,图 6(b)为焊后试样的 CT 检测结果,焊缝中预置的钨丝影像清晰可辨,左下角为焊缝中的钨丝已局部熔化,局部密度高于周围物质密度,右下角凹陷处为焊缝表面一肉眼可见的气孔。

4.2 密度分布表征

邵思杰^[13]研究发现,采用空间分辨率 $10 \sim 25 \mu\text{m}$ 、密度分辨率 $0.1\% \sim 0.05\%$ 、穿透厚度 150 mm 钢的工业 CT 系统,即可满足一些结构复杂,信息量大的非常规灵巧弹药质量检测的需求。许州^[14]针对空间分辨率要求较高的复合材料、微机电(MEMS)器件、石油岩芯检测等领域,研制了高空间分辨率的显微工业 CT 技术,该系统采用 225 kV 微焦点射线源,非晶硅光电二极管 X 射线数字探测器,实现了 $20 \sim 50 \text{ Lp/mm}$ 的空间分辨率。图 7 是微焦点工业 CT 的典型图像。



(a) 煤的 CT 影像

(b) 泥岩的 CT 图像

图 7 微焦点工业 CT 的典型应用

4.3 内部结构逆向工程及装配情况检测

传统的生产过程是从设计图纸到加工、组装成成品的过程,而逆向工程是针对一个结构未知的产品,通过用工业 CT 对其进行一系列的断层扫描,然后将其还原成生产用图纸或产品的过程。对封闭物体进行 CT 检测,不但可以获得物体内部结构组成,还可以得到偏心、变形和间隙等信息,对判断装配质量有重要价值。

陈慧能^[15]针对某外部壳体为金属材质,内部有

非金属、药剂等各种材料的准旋转体结构火工品,先用工业 CT 进行结构纵向断层扫描,判断结构的内部装配关系和产品的工作机理,并测量纵向结构尺寸;再根据不同需要,选择作结构的横向断层扫描,进一步了解内部结构状况细节,并测量内、外径等横向尺寸,从而精确判断出了内部装配关系和产品的工作机理,进而作出该结构的测绘图纸,见图 8。

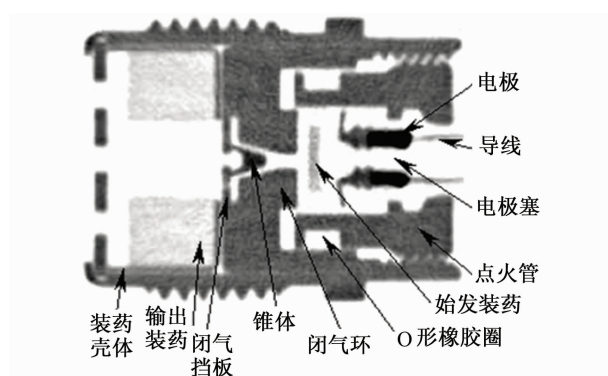


图 8 某产品的纵向工业 CT 断层扫描图

目前工业 CT 逆向工程技术为各行业研制新产品开辟了新的途径,已成为各行业都在研究的新方向。

5 工业 CT 的可能应用方向及展望

随着国家对大型构件可靠性和安全性要求的不断提高,构件的装配质量变化监测已成为保障安全性的关键技术。上述问题的解决,必须依靠工业 CT,尤其是高能工业 CT 方可很好地实现。因此,采用工业 CT,尤其是高能工业 CT 技术,可望解决以下几个方面的技术难题:

- (1) 特种构件焊接质量的精密检测。
- (2) 大型构件的装配质量(如部件姿态、装配间隙和位置变化等)监测和内部结构的精密检测。
- (3) 结构仿真和其它材料和构件的工业 CT 检测等。

参考文献:

- [1] 中国机械工程学会无损检测分会编. 射线检测[M]. 北京:机械工业出版社,1997,4.
- [2] 孙灵霞,叶云长. 工业 CT 技术特点及应用实例[J]. 核电子学与探测技术,2006,26(4):486—488,453.
- [3] 张朝宗. 工业 CT 技术参数对性能指标的影响——兼谈如何选择工业 CT 产品[J]. 无损检测,2007,29(1):48—52.
- [4] 马存宝,李海皓,张潇. 基于改进图像重建算法的工业 CT 系统[J]. 计算机测量与控制,2007,15(11):1494—1496,1555.
- [5] 魏东波,傅健,龚磊,等. 大尺寸构件工业 CT 成像方法[J]. 北京航空航天大学学报,2006,32(12):1477—1480.
- [6] 王黎明,张超,赵英亮,等. 基于平面成像器件的高分辨率工业 CT 技术研究[J]. 中北大学学报(自然科学版),2007,28(6):541—545.
- [7] 杨亮,叶云长,孙灵霞,等. 球形样件轮廓度工业 CT 精确测量方法研究[J]. 核电子学与探测技术,2007,27(5):879—881.
- [8] 王珏,张伟,孙小惟. 基于弧半径投影的多目标工业 CT 图像识别[J]. 计算机工程与应用,2008,44(17):222—223,227.
- [9] 王召巴,金永. 高能 X 射线工业 CT 技术的研究进展[J]. 测试技术学报,2002,16(2):79—82.
- [10] 陈志强,李亮,冯建春. 高能射线工业 CT 最新进展[J]. CT 理论与应用研究,2005,14(4):1—4.
- [11] 丁国富. 大型高能工业 CT 在固体火箭发动机检测方面的应用[J]. CT 理论与应用研究,2005,14(3):35—39.
- [12] 重庆大学重大高科网页[EB/OL]. <http://www.cuhitech.com/4-1.htm>.
- [13] 邵思杰,曹勇,王磊. 无损检测技术在弹药质量检测中的应用[J]. 火力与指挥控制,2006,31(增):39—41.
- [14] 许州,李保磊,陈浩,等. 基于 225 kV 射线源的显微 CT 成像系统研发[C]//2008 年全国射线数字成像与 CT 新技术研讨会论文集. 四川绵阳:《CT 理论与应用研究》编辑部,2008:224—237.
- [15] 陈慧能,杨树彬,崔卫东. 工业 CT 在火工品逆向工程的应用研究[J]. 火工品,2006(3):36—38.

(上接第 503 页)

信号的波幅。因此,在前文对 X 正负规定的前提下,要得到正确的 X 值,需选择较强的 L-S 信号进行测量。

但实际检测过程中,由于焊缝根部表面状况不好,表现在 TOFD 图像中为底面反射波占用周期数较多,一些情况下有可能缺陷变型波信号(L-S)被掩盖在底面反射波之下,而错误地对振幅较小的信号(S-L)进行测量,导致得到的 X 值正负颠倒。笔者曾尝试利用软件差分功能去除直通波,但得到效果不甚理想。

6.2 变型波起点的确定

利用该方法测量的准确性主要取决于获取的 Δt 值的准确程度,因此在寻找变型波信号起点时还需大量的试验验证以及经验的积累。

7 结论

(1) TOFD 检测中由于轴偏离误差的存在,测量得到的缺陷深度不准确,且在软件中不能够获得缺陷偏离探头连线中心的情况。利用推导的两公式迭代的方法可以将缺陷深度精确化,同时得到缺陷

偏离探头连线中心的情况。

(2) 利用公式迭代精确缺陷深度值及获得缺陷偏离探头连线中心的方法可利用计算机编制简单程序进行计算,并可将该程序嵌入到 TOFD 离线分析软件中。

(3) 利用提供的方法计算前,测量 Δt 过程中,寻找缺陷的变型波及变型波起始点的确定还需进一步试验及积累更多的经验。

参考文献:

- [1] Charlesworth. Engineering Applications of Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction[M]. US: Research Studies Pre,2002.
- [2] Baskaran G. Shear-wave time of flight diffraction(S-TOFD) technique[J]. NDT&E International, 2006(39):458—467.
- [3] Betti F. Accuracy capability of TOFD technique in ultrasonic examination of welds[C]// 15th World Conference on Nondestructive Testing, Roma (Italy):[s. n.],2000:15—21.
- [4] 强天鹏. TOFD 技术的检测盲区计算和分析[J]. 无损检测,2008,30(10):738—741.