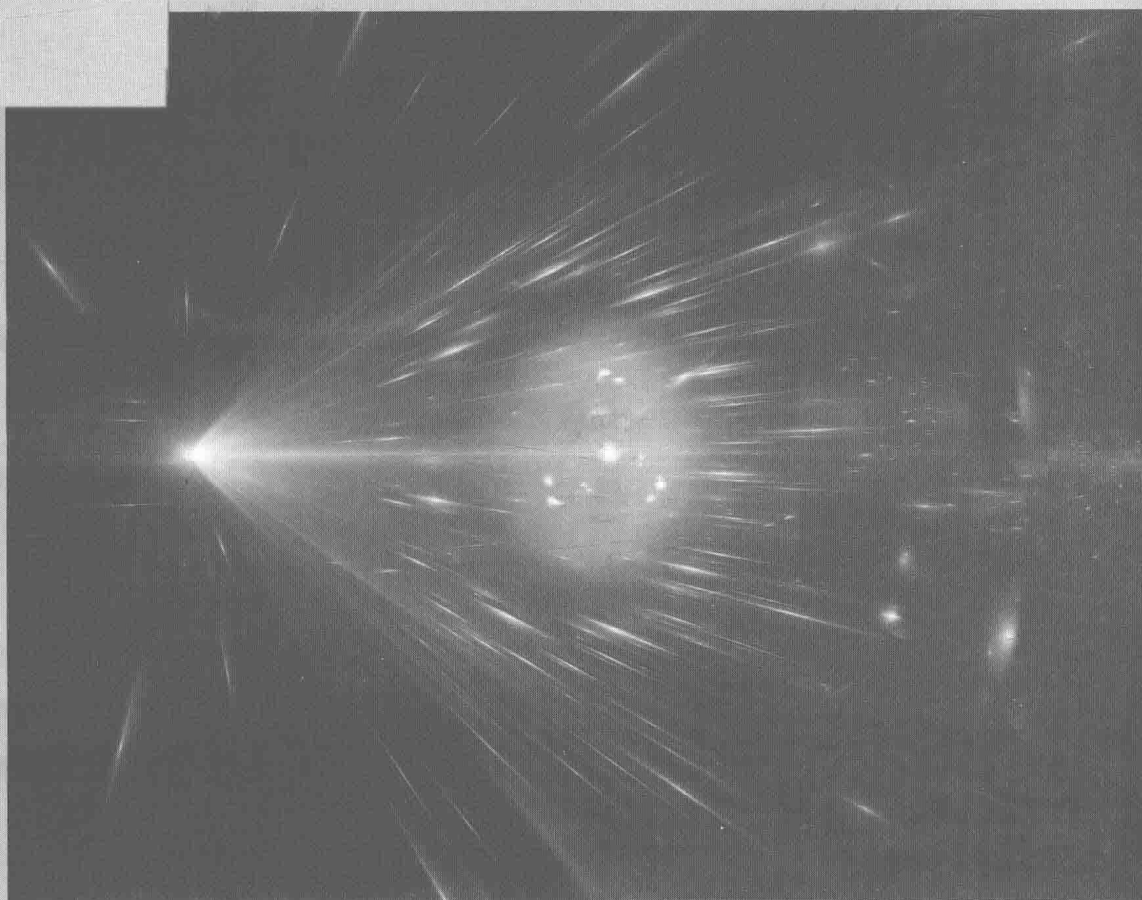


深入剖析系统的核心部件
给出设备选型和技术应用的指导性方法
适合工业和医疗射线数字成像系统

射线数字成像技术

孙忠诚 著





射线数字成像技术

孙忠诚 著

本书对射线数字成像技术相关的设备、理论和原理进行了系统的论述。

本书对射线非胶片成像方法的发展历程做了简要回顾,对射线数字成像技术所涉及的相关名词和概念进行了归类整理,对构成射线数字成像技术的三大核心部件——X射线源、探测器和图像信息处理系统进行了深入剖析。全面论述了图像质量的三大影响因素——空间分辨率、对比度和噪声,在此基础上建立了细节可识别性理论、像质补偿原理和等价性理论。最后对利用本书的相关内容来解决特定产品的检测问题给出了指导性的方法。

本书可供从事射线检测的技术人员、科研人员阅读,也可作为高等院校和职业院校的教材或参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

射线数字成像技术/孙忠诚著. —北京:机械工业出版社, 2018. 7

ISBN 978-7-111-60430-3

I. ①射… II. ①孙… III. ①射线检验—扫描成像 IV. ①TG115.28

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第154795号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:吕德齐 责任编辑:吕德齐

责任校对:刘岚 封面设计:鞠杨

责任印制:常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2018年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·16印张·2插页·237千字

标准书号:ISBN 978-7-111-60430-3

定价:89.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前言

射线数字成像技术是基于现代传感器技术和信息处理技术而发展起来的一种新的检测方法,在无损检测和医疗诊断领域具有广泛而重要的应用价值。与此同时,对射线数字成像产生的大量检测数据进行数据挖掘和加工处理,产生了现代CT检测技术和AI智能检测技术。

自20世纪90年代出现数字探测器阵列(DDA)以来,在全世界范围内兴起了一场以替代胶片照相技术为目标的技术革新,尤其是近年来,射线数字成像技术得到了业界前所未有的关注。传统胶片照相技术将逐渐退出历史舞台而被数字化、智能化射线检测技术所取代,将成为一个势不可挡的发展趋势。

我国是国际上最早使用射线数字成像技术代替胶片照相技术的国家之一。1999年诞生了我国第一个射线数字成像国家标准(GB/T 17925—1999《气瓶对接焊缝X射线数字成像检测》,现行标准已更新为GB/T 17925—2011),在气瓶行业全面代替胶片照相法至今已近20年,产生了巨大的经济效益;2003年制定的射线数字成像标准(GB/T 19293—2003《对接焊缝X射线实时成像检测法》)长期被锅炉制造行业所采用。

射线数字成像技术涉及材料、微电子技术、信息处理技术和射线检测技术等学科,是交叉学科的产物,我国在该技术领域无论是理论研究还是核心技术开发等方面与国外都有很大的差距。虽然近年来在迎头赶上,但在标准制定、技术培训和技术应用等方面还存在诸多认识和经验上的不足。由于技术本身仍处于不断的发展之中,新概念不断涌现,从业人员受语言、专业背景和实际经验限制以及碎片化的获取相关知识的方式,容易对射线数字成像技术产生许多误解或曲解。

本书作者从事射线数字成像技术理论研究、产品开发和工程应用三十余年,本书的编写目的是尝试对射线数字成像技术进行一次比较全面的梳理,起到抛砖引玉的作用,为推动我国射线数字成像技术的发展尽绵薄之力。

本书内容共12章,大致分为以下几个版块:

1. 概论与术语部分

本书的第1章是概论,主要叙述了射线从发现到应用和发展的技术历程,然后描绘了未来的技术发展趋势。编者在第2章专门归纳了射线数字成像技术相关的术语和符号,因为这些概念在传统胶片照相技术中不常见,属于新概念。同时,这些术语对于理解和应用射线数字成像技术非常重要,以此来提醒读者理解其所描述的物理概念和区分它们之间的细微差别。

2. 关键核心部件的制造技术

第3章、第4章和第5章,分别对X射线源、射线探测器和图像信息处理系统从设计制造、设备选型和技术应用的角度进行了比较深入的剖析,有助于加深读者对关键技术和设备的认识,而不只是停留在概念和技术指标的知晓上。

3. 细节可识别性理论

第6章、第7章和第8章对影响图像质量的三要素——图像对比度、空间分辨率和图像



噪声进行了系统的论述。第9章利用经典的 ROSE 模型,建立了射线数字成像细节可识别性理论和参数指标。

4. 像质补偿原理

第10章介绍了像质补偿原理并进行了试验验证。它是细节可识别性理论在数字成像技术中的延伸,是射线数字成像技术的独有特性。

5. 等价性理论

毫无疑问,胶片系统是一个衡量其他射线探测器系统的技术标杆。首先要知道这个标杆究竟有多高,这是评价数字化射线技术与胶片照相技术等价性或者是可替代性的前提条件,也是制定出具有等效性检测标准的基本依据。第11章从胶片系统的特性出发建立了射线数字成像与胶片照相的等价性原理和等价性指标,并用试验数据验证了其科学性。

6. 技术应用

第12章是依据本书所阐述的理论和相关标准来解决实际检测问题时所应遵循的方法,对于技术应用具有实际指导价值。

本书内容力求将理论与实践相结合,对射线数字成像技术进行全面的论述。书中涉及一些公式和图表,对于大多数读者来讲不一定需要理解推导过程,但掌握最终结果对于理解该技术会很有帮助。虽然本书是重点针对使用 DDA 探测器的射线数字成像技术而撰写的,但所涉及的基本理论和使用方法对于 CR 等其他数字化技术同样适用。

谨以此书,献给数十年来关心和支持我的团队和合作伙伴,尤其要感谢我的家人给予的无微不至的照料和贴心的理解。本书在编写过程中部分引用了同行的研究成果,作者在此一并致谢。

由于射线数字成像技术涉及学科众多,受编者的学识、经验所限,书中不可避免地存在不恰当甚至错误之处,敬请广大读者批评指正。

孙忠诚

目 录

前 言

第1章 概论 1

第2章 名词术语 6

2.1 成像技术的名词术语 6

2.2 探测器的名词术语 8

2.3 成像软件的名词术语 11

2.4 图像质量的名词术语 12

第3章 X射线源 14

3.1 X射线源分类 14

3.1.1 手提式X射线源 14

3.1.2 一体式X射线源 15

3.1.3 移动式X射线源 15

3.1.4 固定式X射线源 16

3.2 X射线管 17

3.2.1 X射线的产生 17

3.2.2 阴极特性 18

3.2.3 阳极特性 18

3.2.4 射线管封装 19

3.2.5 X射线管的典型结构 20

3.2.6 焦点尺寸与视角 24

3.2.7 负载特性 27

3.2.8 射线管的辐射场特性 28

3.2.9 X射线管阳极的冷却方式 30

3.2.10 X射线管的老练硬化 30

3.3 高压发生器 31

3.3.1 工频高压发生器 31

3.3.2 高频高压发生器 32

3.4 冷却系统 34

3.4.1 介质散热冷却 34

3.4.2 水循环冷却器 34

3.4.3 油循环冷却器 35

3.5 高压电缆 35

3.6 X射线源特性 37

3.6.1 负载特性 37

3.6.2 电气特性 38

3.7 X射线源保养 39

3.7.1 不能超负荷使用X射线源 39

3.7.2 注意X射线管的老化训练 39

3.7.3 充分预热与冷却 40

3.7.4 日常定期维护 40

3.8 加速器 41

3.8.1 电子感应加速器 41

3.8.2 行波电子直线加速器 42

3.8.3 电子回旋加速器 42

3.8.4 电子直线加速器 43

第4章 射线探测器 45

4.1 探测器分类 45

4.1.1 间接转换探测器 45

4.1.2 直接转换探测器 48

4.2 转换屏材料制备 49

4.2.1 熔体法 49

4.2.2 气相法 51

4.3 转换屏材料特性 55

4.3.1 闪烁体材料 55

4.3.2 光电材料 59

4.3.3 转换屏材料的辐照特性 60

4.4 图像传感器 64

4.4.1 半导体特性与应用 64

4.4.2 MOS结构 67

4.4.3 MOS场效应晶体管

(MOSFET) 68

4.4.4 CCD图像传感器 70

4.4.5 CMOS图像传感器 72

4.4.6 a-Si:H TFT图像传感器 74

4.5 探测器的物理特性 77

4.5.1 DDA的物理结构 78

4.5.2 像素尺寸 81

4.5.3 电子噪声与动态范围 82

4.5.4 A-D转换器与位数 83

4.5.5 探测器增益 84

4.5.6 坏像素列表文件 85

4.5.7 像素单元排列方式 86

4.5.8 曝光时间和帧速 87

4.5.9 数据传输通信接口 87

4.6 探测器的成像特性	89	6.4.2 窗口技术	138
4.6.1 探测器基本空间分辨率 (iSR_b^{detector})	89	6.5 散射射线的影响	139
4.6.2 探测器效率	91	6.5.1 散射射线降低图像对比度	139
4.6.3 对比度灵敏度 (CS_a)	92	6.5.2 降低散射射线影响的方法	140
4.6.4 厚度宽容度 (SMTR)	92	第7章 空间分辨率	142
4.6.5 图像延迟 (lag)	93	7.1 成像过程的数学模型	142
4.6.6 残影 (burn-in)	94	7.1.1 线性移不变系统	142
4.6.7 内部散射射线 (ISR)	95	7.1.2 成像模型	143
4.6.8 DDA 特性表示方法	95	7.2 射线成像系统空间域分析	145
第5章 图像信息处理系统	100	7.2.1 点扩散函数对成像质量的影响	146
5.1 计算机系统	100	7.2.2 射线成像系统的点扩散函数	148
5.1.1 计算机主机	100	7.3 射线成像系统频率域分析	151
5.1.2 显卡	101	7.3.1 调制传递函数 (MTF)	151
5.1.3 显示器	106	7.3.2 射线数字成像系统的调制传递 函数	153
5.2 探测器校正与图像降噪	109	7.3.3 瑞利判据	155
5.2.1 坏像素校正	109	第8章 图像噪声	157
5.2.2 本底校正 (Offset correction)	112	8.1 噪声源	157
5.2.3 增益校正 (Gain correction)	113	8.1.1 量子阱 (quantum sink)	158
5.2.4 动态图像降噪	114	8.1.2 量子噪声	159
5.2.5 静态图像降噪	116	8.1.3 混叠噪声	160
5.3 图像增强	117	8.1.4 电子噪声	160
5.3.1 空间域直接灰度变换	117	8.1.5 结构噪声 (固定模式噪声 FPN)	161
5.3.2 空间域滤波增强	119	8.1.6 噪声的分布特性	161
5.3.3 伪彩色处理	122	8.2 噪声的定量描述	162
5.3.4 高动态范围图像 (HDR) 增强 显示	122	8.2.1 信噪比 (SNR)	162
5.4 图像评定工具	125	8.2.2 探测量子效率 (DQE)	162
5.4.1 图像质量测定	126	8.2.3 维纳光谱	165
5.4.2 几何标定	128	8.3 噪声优化	166
5.4.3 数字参考图像分级	128	第9章 细节可识别性	169
第6章 图像对比度	131	9.1 图像质量参数及相关性	169
6.1 对比度形成因素	131	9.2 ROSE 视觉感知模型	170
6.2 物体对比度	132	9.2.1 ROSE 视觉感知阈值	171
6.2.1 射线强度 (I_0) 对细节对比度的 影响	133	9.2.2 ROSE 视觉感知阈值的统计 模型	171
6.2.2 材料衰减系数对细节对比度的 影响	134	9.2.3 ROSE 视觉感知阈值的数学 方程	172
6.3 探测器对比度	135	9.3 对比度-细节曲线	173
6.3.1 胶片系统的对比度	135	9.3.1 ROSE 模型试块	173
6.3.2 DDA 的对比度	137	9.3.2 对比度-细节曲线	174
6.4 显示对比度	137	9.4 细节可识别性	176
6.4.1 灰阶显示器	137		



9.4.1 细节可识别性判据	176	控制	213
9.4.2 *细节检出能力	178	11.3.4 DDA 系统图像归一化信噪比的 计算	214
9.5 像质计视觉感知阈值	180	11.3.5 图像归一化信噪比的优化	214
9.5.1 EPS 灵敏度计算	180	11.4 图像质量控制	216
9.5.2 线型像质计灵敏度换算	183	11.4.1 胶片成像的图像不清晰度	217
第 10 章 像质补偿原理	185	11.4.2 胶片成像标准对不清晰度的 要求	218
10.1 管电压的补偿原理	185	11.4.3 射线数字成像标准对图像 质量的控制	219
10.1.1 管电压(加速电压)与射线有效 能量	186	11.5 对比试验	221
10.1.2 射线能量对图像质量参数的 影响	186	11.5.1 DDA 系统与胶片系统的对比	221
10.1.3 吸收剂量对 CNR 的影响	188	11.5.2 两种 DDA 探测器系统与胶片成 像和 CR 成像系统的对比	226
10.1.4 最佳射线能量的确定方法	189	第 12 章 检测系统设计	227
10.2 图像分辨率的补偿原理	192	12.1 产品检测技术要求书	227
10.2.1 亚像素(sub-pixel)分辨率	192	12.1.1 产品信息	227
10.2.2 信噪比对分辨率的补偿	193	12.1.2 产品检验信息	229
10.3 大焦点的补偿原理	194	12.1.3 产品检测的其他信息	229
10.4 坏像素校正的补偿原理	196	12.2 关键部件选型	230
10.4.1 仿真图像产生	196	12.2.1 X 射线源	230
10.4.2 仿真结果分析	198	12.2.2 DR 数字成像探测器选型方法	231
第 11 章 等价性	202	12.2.3 实时成像探测器选型方法	235
11.1 胶片系统的特性	202	12.3 检测方式	238
11.1.1 胶片特性曲线	202	12.3.1 平移扫描检测	238
11.1.2 胶片特性参数	204	12.3.2 旋转扫描检测	239
11.1.3 胶片系统分类参数	205	12.3.3 L 形线阵列探测器旋转扫描 检测	240
11.1.4 胶片系统特性的再认识	206	12.3.4 U 形探测器的扫描检测	240
11.2 DDA 系统特性曲线	209	12.3.5 面阵列探测器检测	240
11.2.1 DDA 系统的特性曲线	209	12.4 典型结构	241
11.2.2 DDA 分级方法	211	12.4.1 变位机构	241
11.2.3 DDA 系统与胶片系统的特性 比较	211	12.4.2 射线防护	243
11.3 图像归一化信噪比	211	12.4.3 工作模式	243
11.3.1 胶片系统的图像质量控制	212	12.4.4 质量追溯	245
11.3.2 图像归一化信噪比与检测 灵敏度	213	参考文献	247
11.3.3 DDA 数字成像的图像质量			

1895年11月8日,正当伦琴(图1-1)在实验室里从事阴极放电的实验工作时,一个偶然事件引起了他的注意。当时,房间一片漆黑,放电管用黑纸包严,他突然发现在不超过1m远的小桌上有一块亚铂氰化钡做成的荧光屏发出闪光。他很奇怪,就移远荧光屏继续试验。只见荧光屏的闪光仍随放电过程的节拍断续出现。他取来各种不同的物品,包括书本、木板、铝片等,放在放电管和荧光屏之间,发现不同的物品效果很不一样。有的挡不住,有的能起到一定的阻挡作用。伦琴意识到这可能是某种特殊的从来没有被观察到的射线,它具有特别强的穿透力。于是立刻集中全部精力进行彻底的研究。他一连许多天把自己关在实验室里,连自己的助手和家人都不告知。他把密封在木盒中的砝码放在这一射线的照射下拍照,得到了模糊的砝码照片;他把指南针拿来拍照,得到金属边框的痕迹;他把金属片拿来拍照,拍出了金属片内部不均匀的情况。

他深深地沉浸在这一新奇现象的探讨中以致到了废寝忘食的地步。平时一直帮他工作的伦琴夫人感到他举止反常,以为他有什么事情瞒着自己,甚至产生了怀疑。六个星期过去了,伦琴已经确认这是一种新的射线,才告诉自己的亲人。1895年12月22日,他邀请夫人来到实验室,用他夫人的手拍下了第一张人手X射线照片,如图1-2所示。



图1-1 伦琴(1845—1923)



图1-2 人手X射线照片

几乎在X射线被发现的同时,射线成像技术便应运而生,其神奇的透视效果迅速在欧美地区受到追捧。1896年6月,李鸿章在其环球访问期间接受德国政府的建议,用X射线对其在马关谈判中被日本枪手击中的左颊进行透照,亲眼在一张胶片上看到了日本制造的铅弹是以何种姿势镶嵌在他左眼下的骨头上,从而被他称为“照骨术”。据史料记载,1897年

12 月底, 苏州博习医院引进的 X 射线机是中国最早的一台 X 射线诊断机, 被描述为“无论人身骨肉, 以及竹木纸布内藏什物, 照之无不毫丝毕露”, 说明近代中国对世界科技新潮流非常敏感。

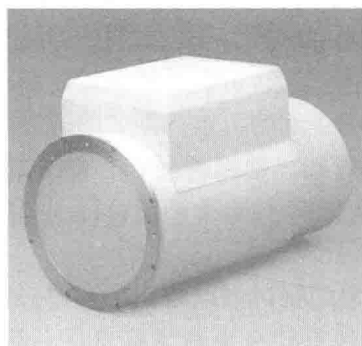
世界上首个无胶片图像装置被命名为“Fluoroscope”, 是在伦琴发现 X 射线几个月后开发出来的, 如图 1-3 所示。

该装置由一个磷光屏组成, 该磷光屏在 X 射线的照射下能够发光。该屏被放置在一个黑暗观察环境中, 以补偿磷光屏的亮度不足。操作者在屏的另外一侧进行观察, 通过上下、左右移动磷光屏, 实现对不同位置的检查。这类装置可称为第一代无胶片射线检测技术, 是现代数字化射线检测技术的雏形。

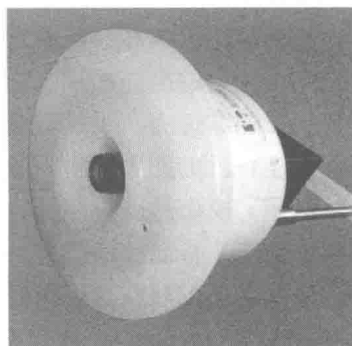
20 世纪 50 年代, 随着图像增强器的出现, 技术发生了巨大的变化, 第一次得到了实时的清晰图像, 可称为第二代无胶片射线检测技术, 如图 1-4 所示。



图 1-3 早期的磷光屏成像场景



a) 图像增强器



b) 摄像机构

图 1-4 图像增强器及摄像机构

通过图像增强器, 将输入荧光屏上采集的低亮度 X 射线图像, 聚焦在输出磷光屏上获得高亮度图像, 可以人工直接观察或通过电视摄像机先获得视频信号, 然后通过显示器观察, 被称为“X 射线电视系统”。由于电视摄像机可以输出 25 帧/s 的电视图像, 可以动态、实时地检查运动物体, 后来常被称为“X 射线实时成像系统”。在 20 世纪 80 年代初期, 基于图像增强器的 X 射线实时成像技术已经在科研、工业领域开始应用, 例如, 用于液化石油气钢瓶对接焊缝检测、军工行业的火工品填充状态检测、焊接钢管检测等。编者在 20 世纪 80 年代初期, 使用图像增强器和高速摄影系统对焊接熔滴过渡形态和飞溅产生机理进行了系统研究, 在 1000 帧/s 的拍摄速度下清晰地观察到熔滴内部气泡的生成、长大和爆炸过程。基于图像增强器的 X 射线实时成像技术至今仍有应用, 尤其在图像质量要求不高的场合, 具有其他检测方法无可比拟的速度优势。但较大的图像噪声、较低的检测灵敏度一直是这种技术的弊端。

从 20 世纪 80 年代中期开始, 随着微电子技术的逐渐兴起, 数字图像处理技术被用来改善射线图像质量, 形成了基于微计算机的软件处理和基于数字逻辑电路的硬件处理两种技术。硬件处理技术在当时计算机运算速度较低的条件下具有速度优势, 但由于缺乏灵活性后来逐渐被软件处理技术淘汰。微计算机的应用, 引领射线检测技术进入了数字图像处理时代, 即第三代无胶片射线检测技术, 如图 1-5 所示。



a) 液化石油气钢瓶检测

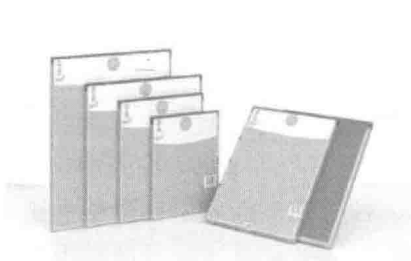


b) PC (CPU286) 图像处理系统

图 1-5 中国首套代替胶片照相的射线数字成像检测系统 (1994 年)

这种技术的特征是基于视频图像的后处理, 最后的观察图像一般是在工件静止的条件下连续采集多帧图像数据经过叠加或平均后得到的, 该技术明显改善了图像质量, 极大推进了射线无胶片检测技术的发展, 在一些重要的场合, 如: 钢管管端焊接接头、石油液化气钢瓶焊接接头、弹药密度检测等领域应用。1999 年诞生了中国第一个射线数字成像技术代替胶片照相技术的国家标准 GB/T 17925—1999 (注: 现行标准已更新为 GB/T 17925—2011)。

在数字图像处理时代, 还有两种技术值得关注。一种是被称为 CR 的计算机成像技术, 它是用 IP 影像板替代胶片, 将储存于 IP 的 X 射线信号用激光扫描转换为电信号并进行数字图像处理的一种技术, 是一种离线的射线数字成像方法, 如图 1-6 所示。



a) IP板



b) 扫描装置

图 1-6 CR 成像装置

另一种是胶片数字化技术, 如图 1-7 所示。这种技术严格来讲并不是一种检测方法, 而仅是一种将射线照相底片影像信息转化为数字化图像进行存储的方法。

胶片数字化设备能将工业底片数字化后输入计算机, 将胶片密度转换为计算机可识别的数字化图像灰度, 并通过专用的图像处理软件, 对其进行处理、分析、评价及储存管理。

无论是图像增强器成像技术还是 CR 或胶片

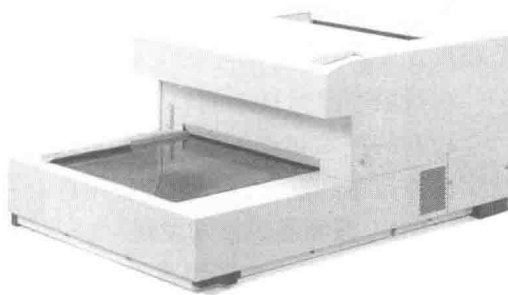


图 1-7 胶片数字化仪

数字化技术,其特点是系统结构噪声大、动态范围小,从本质上可以归入泛数字化射线检测系统,图像质量跟胶片系统相比仍有一定的差距。

1995年,在纪念伦琴发现X射线100周年之际,射线直接数字成像技术得到了广泛的研究并迅速实现了商品化,从而带动射线无胶片检测技术进入了完全数字化时代,即第四代数字化射线检测技术。图1-8所示的非晶硅数字平板探测器,是以数字探测器阵列(DDA)为代表的新型射线探测器,集成了材料、微电子、通信、软件等现代技术,极大地提升了检测图像的动态范围和信噪比,使得非胶片射线检测技术发生了质的飞跃,人们开始意识到真正的胶片替代技术已经来临。



图1-8 非晶硅数字平板探测器

射线数字成像检测技术与射线胶片照相技术之间的差别是显而易见的。一是DDA探测器的基本成像单元是像素,不同探测器之间像素尺寸的差别较大,与胶片相比空间分辨率较低;二是DDA探测器检测时,由于受工件形状限制或出于设备安全考虑存在一定的几何放大倍数,几何不清晰度对图像质量的影响更加明显;三是胶片系统可以满足不同厚度工件的检测要求,但一套DDA探测器因为设计原因可能适用的材料厚度范围受限而需要两种甚至多种探测器才能满足较大厚度范围的物体检测要求。

射线数字成像技术与胶片照相技术的等价性问题是无论如何都无法绕开的话题,尤其是在一些使用胶片照相法的传统行业。等价性问题,归根结底是对细节的检出能力问题,或者是细节的可识别性问题。它主要包括两个方面的内容,一是DDA探测器系统与胶片系统的等价性,它需要建立合适的技术参数来解决,具体还会涉及探测器系统的分级方法;二是检测标准的等价性,通过规定具体的检测工艺和方法,来保证检测结果的一致性。对于大多数X射线胶片照相检测标准,一般都是通过控制最小焦距的办法来控制图像几何不清晰度(胶片的固有不清晰度或基本空间分辨率值较小),没有在图像质量标准中提出明确要求。对于DDA探测器,产生的是离散化数字图像,探测器基本空间分辨率相对于胶片系统较低,因此确立分辨率指标和这些指标与胶片系统的等效性等则是方法标准必须解决的课题。

随着数字化射线检测技术的应用普及,许多标准化组织相继发布了射线数字成像检测标准。毫不夸张地讲,没有建立在细节可识别性理论、像质补偿理论和等价性理论基础之上的射线数字成像检测标准都是不完善的,这些标准规定的方法和技术指标都存在一定的主观性,在实际应用中按照标准规定的程序作业并不能获得理想的效果,有时甚至与实际情况完全相反。

射线数字成像技术的春天已经到来,但技术的发展却永无止境。

现有的技术和设备能力还远不能满足产品生产的检测需要。在未来几年,可以预见射线数字成像技术和基于该技术的应用将会在以下几个方面得到突破:

1. DDA探测器的技术发展

首先是智能DDA探测器的开发。现有的DDA探测器是在基于PC的软件控制下完成数据采集工作的。智能DDA探测器将是一种高度集成化的微小型射线视觉系统,它将图像的采集、处理与通信功能集成于探测器内,从而提供具有多功能、模块化、高可靠性、易于实



现的数字成像解决方案。同时,由于应用了最新的 DSP、FPGA 及大容量存储技术,其智能化程度不断提高,可满足多种射线数字成像的应用需求。

其次是具有一定弧度的曲面探测器的开发。现有的 DDA 探测器都是在玻璃基板上利用非晶硅薄膜技术(a-Si TFT)进行图像传感器电路制作的,属于无机薄膜晶体管技术。目前有机薄膜晶体管(OTFT)的综合性能已经达到商用非晶硅水平,其鲜明的低生产成本和高功能优点已显示出巨大的市场潜力和产业化价值,将很快成为新一代平板探测器制造的核心技术。

2. 智能化射线数字成像设备

随着许多国家将人工智能(AI)确定为国家发展战略,满足工业 4.0 标准的智能射线检测设备将会在不久的将来被广泛采用。这些设备将以缺欠自动识别(ADR)技术为基本特征,利用机器人和机器视觉技术自动识别工件类别、自动抓取检测工件、实现“OK”“NG”产品的自动分选;大量的设备故障预警和设备故障诊断模型将会被开发出来,利用传感器技术和物联网技术实现设备的自动维护。

图 1-9a 所示为人工识别灵敏度为 3% 的原始图像,图 1-9b 所示为利用图像复原技术和缺欠自动识别技术提取的灵敏度约 1.0% 的缺欠。

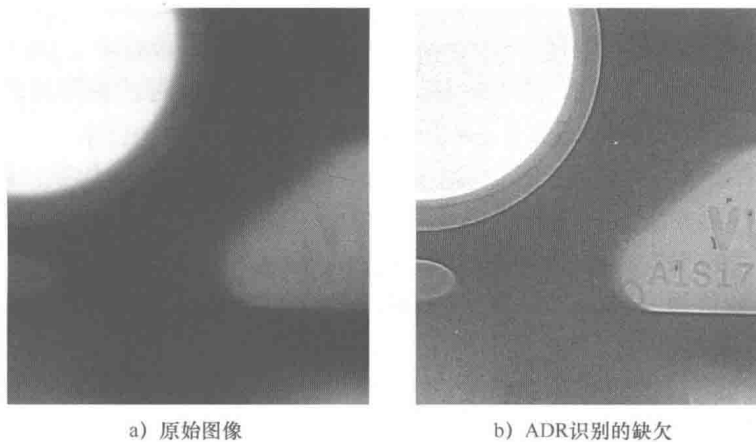


图 1-9 缺欠自动识别技术

3. 在线 CT 检测技术

尤其是在铸造零件检测领域,在生产线上利用快速 CT 重建技术进行工件的在线检测将会升级现有的 DR 成像技术,促使 CT 技术从象牙塔上走下来成为一种常规的无损检测技术,使得产品质量得到更好的保证。

4. 质量追溯系统

基于检测数据云存储的质量追溯系统会成为质量监理和管理部门的首选技术,由此可能会改变现有的质量管理模式,可能会出现专门的图像评估公司代替各个机构现有的专业评估人员,实现第三方评估和社会高级检测人员的资源共享。

伴随着数字化射线检测技术的出现,产生了一大批新的名词和术语。这些名词和术语都有明确的物理意义,用于表示系统、部件、软件或图像的某种特性。为了便于理解,本章按照这些名词和术语出现的场合进行了归类。

2.1 成像技术的名词术语

1. 数字化射线检测技术

数字化射线成像是以产生数字图像为基本特征,通过计算机屏幕进行显示和评估并可对数据进行长期存储的射线检测方法的总称。包含了数字成像技术(DR)、计算机成像技术(CR)和各种CT成像技术。胶片数字化技术可以认为是一种泛数字化射线检测技术。

2. 射线数字成像(digital radiography, DR)

射线数字成像是在受检对象与射线源-探测器系统相对静止的条件下,利用DDA探测器进行射线成像的检测方法。射线数字成像可以通过较长时间的曝光和图像积分(帧平均)等技术来获得较高的图像质量。

3. 射线计算机成像(computed radiography, CR)

射线计算机成像是一种以IP成像板(Imaging plate)为载体来记录X射线潜在影像信息,并通过光学扫描器激发并转换为图像数据输出至计算机处理系统的一种成像方法。射线计算机成像系统主要包括两大部分:成像板与扫描器。成像板是X射线影像的接受体,准确地说它是一个影像信息的采集与信息形成的转换部件,是由保护层、成像层、支持层和背衬层复合而成的一块柔性薄板,可以在数小时内保存潜影信息,也可以通过光学二次激发进行潜影擦除后反复使用。扫描器的作用是将成像板中储存的潜影信息解读出来。它由激光器、光扫描器、光电倍增管、放大器、A-D转换器和输出接口等部分组成。计算机成像技术只能用于静态检测。

4. 射线实时成像(real-time radiology, RTR)

射线实时成像是在受检物体与射线源-探测器具有一定的相对运动速度下,对受检物体实行动态检测的一种方法。射线实时成像要求探测器具有较高的帧速,一般需大于25帧/s。实时成像由于探测器吸收的射线剂量低和运动不清晰度的影响,相对于静态检测图像质量有明显降低。

5. 射线断层成像(CT)

射线断层成像是一种利用扇束射线对受检物体进行透照,通过采集不同透照角度的序列化投影图像,利用重建软件来获取物体横截面密度分布信息的检测技术。CT断层成像技术



是一种基于射线数字成像硬件设备的软件技术,为了得到断层图像的高精度几何尺寸和较高的密度分辨率,要求对机械和运动进行高精度调校,断层成像一般使用线阵列射线探测器。

6. 锥束 CT 成像 (CBCT)

锥束 CT 成像是一种利用锥形射线束和面阵列探测器采集受检物体不同角度透照的检测图像,利用重建软件得到物体三维结构的成像方法,重建完成后可以按照任意方向对物体进行切片观察。

7. 线对和线对数

高密度材质制成的不同宽度(或不同直径)的栅条按照等间距排列,一根栅条和一个间距构成一个线对。每毫米宽度范围内可排列出的线对数量称为线对数,用 L_p/mm 来表示。线对数是用空间频率来表示空间分辨率的一种方法。

8. 系统分辨率

系统分辨率是射线数字成像技术在早期曾经使用过的概念,目前已很少采用。其测量结果类似于探测器基本空间分辨率(SR_b^{detector})。

9. 点扩散函数 (PSF)

点扩散函数又称冲激响应函数或脉冲响应函数,它描述了成像系统在冲激函数作用下的输出特性,是在空间域描述成像系统特性的一种方法。成像系统的某个像素点 $p(x,y)$ 在一个作用时间极短暂、作用值很大及积分有限的脉冲激励下,其输出不再是一个脉冲信号,也不只是对该像素点的输出值产生影响,而是对 $p(x,y)$ 和周边像素均产生作用,形态上类似高斯曲线。点扩散函数的形状和扩散的宽度范围决定了图像的清晰度。扩散范围越小、分布形状越尖锐,图像清晰度越高。

10. 半峰全宽

点扩散函数(PSF)峰值一半的高度所对应的宽度称为半峰全宽,是将钟形点扩散函数等效为矩形脉冲时所对应的宽度。

11. 调制传递函数 (MTF)

调制传递函数是在频率域描述成像系统特性的一种函数,表示了成像系统对不同频率信号的对比度传输能力。

12. 人工模式 (manual mode)

人工模式是指由人工直接或通过控制按钮操控受检物体或(和)射线管-探测器运动进行射线检测的一种模式。

13. 示教模式 (teaching mode)

示教模式是一种通过人工预设物体的检测策略的模式。利用人工模式确定受检物体的透照方向、透照位置、透照顺序和透照参数,计算机软件记录这些参数然后形成过程程序,可以被半自动模式和全自动模式进行调用。

14. 半自动模式 (semi automatic mode)

半自动模式通过示教程序建立特定受检物体的透照方向、位置、顺序和参数并形成计算机程序,然后检测系统根据受检物体种类执行相应的程序,自动采集各个位置的检测图像并由检测人员进行缺欠识别和质量分级的一种检测模式。

15. 全自动模式 (full automatic mode)

全自动模式是通过示教程序建立特定受检物体的透照位置、透照顺序和透照参数并形成



计算机程序,然后检测系统根据受检物体种类执行相应的程序,自动采集各个位置的检测图像并由计算机软件进行缺欠识别和质量分级(ADR)的一种检测模式。

16. 系统校验

系统校验是利用像质计或含有已知缺欠的试样,定时对检测系统特性进行的测定。当检测系统达到相应的像质计参数或可以发现已知的缺欠时,说明系统工作在正常状态,否则,需要对系统特性进行重新校准。

2.2 探测器的名词术语

1. 图像增强器 (I.I)

图像增强器是一种能够将不可见的 X 射线转换成可见光图像,并能增强输出图像亮度的电真空装置。它由输入屏组件、电子光学系统和输出荧光屏组成。X 射线图像增强器工作时,X 射线通过受检物体后照射到 X 射线图像增强器的 CsI: Na 屏上,使该屏发出微弱光亮,由于受检物体各部分吸收 X 射线的剂量不同,在 CsI: Na 屏上就出现与此相应的强度分布不等的微弱光图像。此图像照射到与其紧贴的光电阴极上,激发光电阴极产生密度分布与该图像亮度分布对应的光电子,光电子被聚焦、加速后投射到输出屏上,就得到尺寸缩小而亮度增强的可见光图像。图像增强器是一种非线性成像系统,动态范围小,图像信噪比较低。

2. 数字探测器阵列 (DDA)

数字探测器阵列是一种将射线转换为分离的、成阵列化排列的、大小与所在区域曝光量成比例的模拟信号,并经过数字化转换后可传送到计算机系统显示的电子装置。DDA 探测器是可输出数字图像的射线探测器的总称。射线转换可使用闪烁体材料首先转化为可见光,然后利用图像传感器转化为模拟信号,也可使用光电材料直接转化为模拟信号。数字探测器阵列可以经过数秒曝光产生一幅图像,也可在每秒产生数帧实时图像。

3. 线阵列探测器 (LDA)

线阵列探测器是一种将射线转换为分离的、成单行排列的、大小与所在区域射线强度成正比的模拟信号,并经过数字化转换后可传送到计算机系统显示的电子装置。线阵列探测器每帧只输出一行的图像数据,需要受检物体与射线源-探测器做相对运动才能生成完整的受检物体检测图像。线阵列探测器具有非常高的帧速,常用于检测速度较高的场合。

4. 多线阵列探测器 (Multi LDA)

多线阵列探测器也称 TDI (时间延迟积分) 探测器,是一种将多行输出信号在内部进行积分后作为单行信号输出的线阵列探测器。多线阵列探测器每帧也只输出一行的图像数据,需要受检物体与射线源-探测器做相对平移运动才能生成完整的受检物体检测图像。相比单行线阵列探测器,多线阵列探测器可以提高检测速度、减小曝光量和提高图像信噪比。

5. 面阵列探测器 (FPD)

面阵列探测器俗称平板探测器,采用在玻璃基底上制作 TFT 阵列的加工技术,是 DDA 探测器的典型结构,常用于射线数字照相 (DR)、锥束 CT 成像,也可以在具有相对运动速度下进行实时成像检测 (RTR)。



6. 非晶硅探测器 (a-Si FPD)

非晶硅探测器是一种以图像传感器 (image sensors) 的制造技术来命名的射线探测器。这种探测器的图像传感器是在玻璃基板上制成的, 其中像素与数据线的开关使用了非晶硅薄膜晶体管 (a-Si: H TFT) 制造技术。使用发光闪烁体与非晶硅图像传感器配合结构的探测器称为间接转换探测器; 使用非晶硒等光电材料薄膜与非晶硅图像传感器配合结构的探测器称为直接转换探测器。目前, 大面阵射线探测器大多数采用非晶硅薄膜晶体管制造技术。

7. 非晶硒探测器 (a-Se FPD)

非晶硒探测器是一种以射线光电转换屏材料来命名的射线探测器。该探测器使用非晶硒薄膜直接将射线转化为电信号然后由图像传感器进行阵列化处理和信号分割。

8. DDA 有效区域

DDA 有效区域是探测器制造商推荐的可用于成像的区域尺寸和位置。

9. 探测器动态范围

探测器动态范围是探测器接近满幅灰度值时的最大曝光量与开始响应时的最小曝光量之比。探测器动态范围表示了有效响应时的曝光量变化范围, 该范围越宽、比值越大, 探测器的动态范围也越高。

10. 像素 (pixel)

像素是探测器成像的最小独立单元, 也可称为像元。探测器像素主要由光电感应传感器、电容器、TFT 薄膜开关和行/列分布的数据线等组成。

11. 填充系数

填充系数是像素的光电感应区面积占像素总面积的百分比。一般而言, 在相同像素尺寸条件下, 填充系数越大, 图像信噪比越高。由于受制造工艺的限制, 像素尺寸越小, 填充系数越低, 探测器动态范围和信噪比会有所降低。

12. 像素尺寸 (pixel size)

单位长度与其排列的像素总数之比记为像素尺寸。例如: 某探测器在长度 205mm 内排列有 1024 个像素, 则像素尺寸为 $200\mu\text{m}$ 。对于面阵列探测器, 像素的宽度和高度相等, 呈正方形; 许多线阵列探测器 (尤其是 CT 用探测器) 一般像素的高度大于宽度。

13. 像素中心距 (pixel pitch)

像素中心距是指水平 (或垂直) 排列的相邻两个像素的中心位置距离, 数值上等于像素尺寸。

14. 坏像素

坏像素是指其响应偏离正常像素特性范围的像素, 包括孤立坏像素和集群坏像素。

在 $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ 邻域内, 如果像素邻域内完好像素少于 5 个, 则称为集群核像素 (CKP)。如果集群坏像素中没有集群核像素, 则坏像素是可以校正的, 称为非相关型的集群坏像素。如果集群坏像素中存在集群核像素, 可称为相关型的集群坏像素。

15. 坏像素校正

坏像素校正是利用插值法对坏像素灰度值进行重置的一种软件处理方法。

16. 灰度等级 (grey scale)

灰度等级是指探测器像素对应的灰度值变化范围, 一般用 2^n 来表示。灰度等级是由探测器 A-D (模数转换器) 的位数来决定的。例如, 如果采用的 A-D 转换器是 16bit, 则探测器