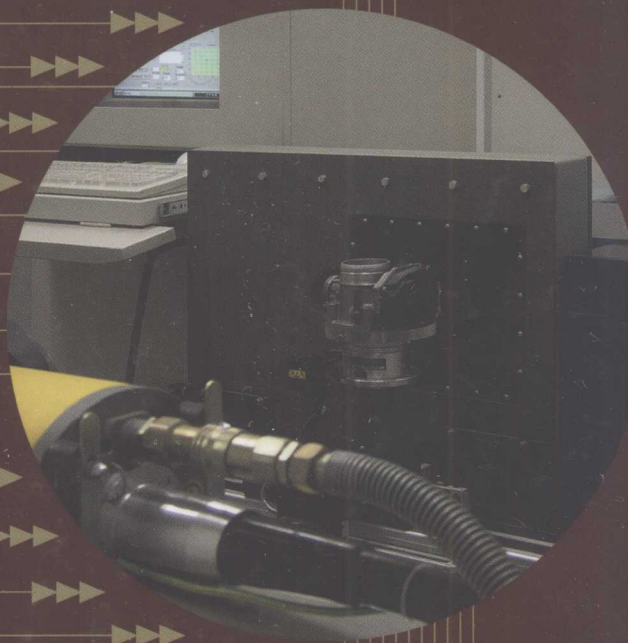


张朝宗 郭志平 等 编著
张 朋 王贤刚

工业CT

技术和原理



科学出版社
www.sciencep.com

工业 CT 技术和原理

张朝宗 郭志平
等 编著
张 朋 王贤刚

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书结合作者约 20 年来从事工业 CT 科研和制造工作的经验和体会,对工业 CT 的理论基础、基本技术作了比较系统的介绍。本书分为入门篇和中级篇两部分。入门篇着重介绍工业 CT 理论和实际应用中最基础的概念,尽可能减少数学推导和涉及原子核物理学方面专门知识,主要面向一般工程技术人员,使具有大专水平甚至高中数理基础的人员都可以读懂。中级篇论述了工业 CT 技术中稍微深入一些的问题,并在最后对三维图像、反向工程及相衬 CT 等较新技术也作了简要介绍,为希望进一步钻研 CT 技术的人员提供进入专业学习的桥梁。本书可用作 CT 设计研究人员或大专院校研究生参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工业 CT 技术和原理/张朝宗等编著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-024877-0

I. 工… II. 张… III. 计算机应用—无损检验 IV. TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 105624 号

责任编辑:张海娜 / 责任校对:李奕莹

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencecp.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2009 年 6 月第一次印刷 印张: 12 3/4

印数: 1—3 000 字数: 279 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

前 言

工业计算机断层成像(industrial computed tomography)简称工业 CT,是一种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。

工业 CT 出现的时间虽比目前医院里常用的医用 CT 稍晚,也有 30 多年的历史了,但其在我国的“知名度”远不及医用 CT,只是近年来才开始受到越来越多无损检测人员的关注。目前医用 CT 已经成为不可缺少的临床诊断工具,对其发展做出重要贡献的 Cormack 和 Hounsfield 得到了科学界最高荣誉奖——诺贝尔奖。

实际上,工业 CT 是一种有广泛应用前景的检测工具,有着其他无损检测手段所不具备的许多重要功能。在国外,工业 CT 不仅已经应用到航空航天、火工品、精密机械等重要产品的检测方面,还用到汽车、石油、地质、考古、木材等许多领域。近年来国内关于它的应用和发展也很迅速。

利用工业 CT 可以非接触、非破坏地检测物体内部结构,得到没有重叠的数字化图像,不仅可以精确地给出物体内部细节的三维位置数据,还可以定量地给出细节的辐射密度数据,最后一点是任何其他无损检测手段所不具有的重要特点,在这方面与医用 CT 几乎是一样的。另外,工业 CT 的检测对象要比医用 CT 广泛得多,从微米级的集成电路到直径 1m 以上的大型工件,从密度低于水的木材或其他多孔材料到高原子序数的重金属材料,都是工业 CT 的检测对象。工业 CT 的检测要求从各类内部缺陷到装配结构和尺寸测量也各不相同。这就使不同用途的工业 CT 系统所用的射线源、射线探测器和系统结构与医用 CT 很不相同,即使不同用途的工业 CT 系统之间往往也有很大差别。从这个意义上说,理解工业 CT 比理解医用 CT 更加困难。

CT 是一种通用的技术,了解 CT 的意义不仅局限于工业 CT 和医用 CT 本身,重要的是理解这种技术的本质和精髓。前面已经提到 CT 是一种从外部投影数据重建物体内部结构图像的技术,事实上可以将外部投影数据扩展到声、光、电、磁数据以及其他任何一种物理参数,其内部“结构图像”可以扩展为物体内部各种相应的性能分布图像。这样有什么样的“射线”,就可以做成什么样的 CT。目前已有的 CT 技术很多,如超声 CT、中子 CT、磁共振成像、地球物理 CT、电容 CT 等。

CT 又是一门综合的科学技术,涉及物理、数学、机械、电子、计算机以及许多专业的技术领域。但是目前相关技术参考资料多数以文献形式发表,涉及的学科非常分散,跨越的年代很长,很多文献又涉及较深的专业知识,多数入门者往往会感到找不到头绪。由于目前没有系统介绍工业 CT 的专著,而 CT 应用者的队伍却在迅速扩大,因此对系统介绍工业 CT 读物的需求还是相当迫切的。

1985 年科学出版社出版了 Herman 于 1980 年所著《由投影重建图像——CT 的理论基础》的中译本,多年来该书在国内一直被当作 CT 的经典书籍,但因出版年代较早,且重

点在于论述 CT 图像重建的基础理论,近 20 多年的 CT 技术的新发展在该书中没有得到反映,同时有关 CT 构成、设计和许多实际的重要技术问题,如伪像的产生、鉴别和校正都没有涉及。2006 年科学出版社出版了 Jiang Hsieh 所著《计算机断层成像技术——原理、设计、伪像和进展》中译本,比较全面地论述了 CT 理论和各种实践问题。该书内容涉及 CT 系统关键技术的各个方面,如 CT 系统构成、设计、伪像校正等。然而该书像大多数 CT 专著一样,主要是面向医学界的。至今为止,专门叙述工业 CT 技术问题的论著几乎没有。2006 年机械工业出版社出版的《计算机层析成像检测》主要是面向国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训使用的,其知识面和系统性对于我国从事 CT 工作的广大工程技术人员和科研工作者来说也稍显不足。

从目前实际应用的情况看,在无损检测领域采用 X 射线的设备占有绝大多数,因此本书将讨论范围局限于 X 射线 CT。虽然 γ 射线 CT 也在一些场合下应用,但是 γ 射线和 X 射线与物质的相互作用机理没有什么不同,理解了 X 射线 CT 就会很容易了解 γ 射线 CT,因此没有必要再对 γ 射线 CT 作专门的介绍。

本书的目的在于全面系统地介绍与工业 X 射线 CT 相关的知识,帮助读者对工业 CT 的主要问题建立比较清晰的整体概念,提供进一步深入研究各种具体问题的“接口”。同时通过对工业 CT 这一具体实例的解剖,提供一种考虑问题的途径和思路。对于在实践中常见的关键问题给予明确的解答;对于比较深入的主要理论问题和当前发展趋势,也将进行简明而且必要的论述,同时提供国内外最新公开发表的重要文献目录。我们希望本书能够具有实践性和桥梁作用这两个基本特点。

CT 技术产生以来的几十年里一直在迅速发展,本书不可能触及最新技术的各个方面,只能介绍相对“经典”的工业 CT 成像原理和技术,也就是主要涉及仅生成一个“切片”的二维横向工业 CT 系统。不过,搞清了这样一个“经典”系统的原理及相关技术,理解了此种技术的本质和精髓,再进一步研究各种工业 CT 的“变体”就会很容易。

作者通过本书把 20 年来从事工业 CT 研究和制造中学到的知识和体会汇总起来介绍给读者,供那些继续或将要从事工业 CT 工作的读者参考,帮助他们更快“进入角色”或少走弯路。作者将本书看做科学出版社 2006 年出版的 Jiang Hsieh 所著《计算机断层成像技术——原理、设计、伪像和进展》中译本的姐妹篇,或是一种补充。通过学习这两本书,读者就可以对工业 CT 涉及的基本理论和实践问题有比较全面的了解。但由于作者的见识和水平有限,书中不妥或不足之处在所难免,望读者不吝赐教,批评指正。

本书分入门篇和中级篇两个部分。入门篇着重介绍工业 CT 理论和实际应用中最基本的概念,主要面向工程应用人员,注意突出物理概念,尽量减少需要较好基础才能理解的大量数学公式。对于必要的数学推导,力求把公式的意义或结论讲清楚。希望做到即使跳过不看,一般具有高中毕业以上的数理基础也能读懂公式的结论或主要意思。中级篇将深入浅出地论述工业 CT 技术中比较专业一些的问题,以满足希望进一步了解 CT 技术的人员的需要,为他们提供进入专业学习的桥梁。更加深入一些的专业知识,可以查阅书中引用的各种科技文献。中级篇的最后部分对三维图像显示、反向工程以及相衬 CT 等较新相关技术也作了简要介绍。

本书共分 11 章,各章的作者如下:

入门篇

第 1 章 引言(张朝宗)

第 2 章 预备知识(郭志平)

第 3 章 工业 CT 的基本组成(郭志平)

第 4 章 工业 CT 系统的性能和指标(张朝宗)

第 5 章 工业 CT 的安装、调试和使用(肖永顺)

第 6 章 工业 CT 系统的选择和设计(张朝宗)

中级篇

第 7 章 CT 扫描数据采集技术(张朝宗、肖永顺)

第 8 章 工业 CT 图像重建算法(张朋)

第 9 章 计算机仿真与 CT 伪像(张朝宗、王贤刚)

第 10 章 CT 相关技术(肖永顺、叶青)

第 11 章 相衬 CT(朱佩平)

全书内容的布局、编写分工、最后汇总和定稿由张朝宗负责,图表由郭志平负责整理。

在本书即将面世之时,作者要对多年来给予工业 CT 研究项目热情支持的田杰模教授表示感谢,他的帮助一直伴随着作者 20 多年的研究工作生涯。作者特别提到曾经在研究组内攻读学位的几位学生,他们是吕军震、单海平、张和平、张颖、郑玉红和彭亚辉,以及研究组内的同事董宇峰,是他们和作者一同度过了研究组开创期间那些难忘的日日夜夜。同时作者不会忘记貂大卫教授和徐沔研究员,他们曾分别与作者合作研究 CT 数年,本书中也有与他们共同工作过程中取得的经验和体会。在本书编写过程中,作者曾分别向刘原中教授、刘以农教授和林郁正教授在辐射防护方面、辐射探测器探测效率方面和加速器性能方面多次请教,并得到了他们的热情帮助,在此一并表示感谢。最后作者要感谢夫人王丽辉,多年来她一直受到病痛折磨,但无论是从事科研工作的 20 多年中还是编写本书的一年多以来,都给了作者多方面的帮助,没有她的支持就没有本书的顺利完成。

张朝宗

2009 年 3 月于北京

目 录

前言

入 门 篇

第 1 章 引言	3
1.1 从“盒子里装的是什么”谈起	3
1.2 用未知数 X 定义的射线	3
1.3 无胶片照相技术	4
1.4 “要把西瓜切开才能看清楚”	5
1.5 传统断层成像技术	6
1.6 怎样才能免除重叠图像的干扰	7
1.7 历史性的突破	8
1.8 现代工业 CT 实例	9
参考文献	11
第 2 章 预备知识	12
2.1 数字化图像.....	12
2.2 投影.....	13
2.3 理解图像重建的概念.....	15
2.4 投影数据和正弦图.....	18
2.5 与 CT 应用相关的几个物理问题	21
2.5.1 射线与物质的相互作用	21
2.5.2 不可抗拒的统计规律	26
2.5.3 部分体积效应	26
2.5.4 射线的多色性和硬化	28
参考文献	29
第 3 章 工业 CT 的基本组成	31
3.1 工业 CT 常用的两种扫描模式	31
3.2 工业 CT 系统常用的射线源	35
3.3 射线探测器和准直器.....	42
3.3.1 分立探测器	42
3.3.2 面探测器	43
3.3.3 准直器	45
3.4 数据采集系统.....	46
3.5 扫描机械系统.....	47
3.6 计算机硬件和软件.....	48

3.7 辅助系统(辅助电源和安全系统).....	49
参考文献	50
第 4 章 工业 CT 系统的性能和指标	51
4.1 工业 CT 的性能参数概述	51
4.2 图像对比度	54
4.3 点扩散函数和调制传递函数	55
4.3.1 点扩散函数对 CT 图像的影响	55
4.3.2 调制传递函数对 CT 图像的影响	57
4.4 噪声对 CT 图像的影响	59
4.5 CDD 曲线	60
4.6 伪像概述	61
4.7 工业 CT 系统的验收和指标测定	62
4.7.1 检测空间分辨率的传统模体和方法	63
4.7.2 检测密度分辨率的传统模体和方法	64
4.7.3 圆盘法检测空间分辨率和密度分辨率	65
参考文献	67
第 5 章 工业 CT 的安装、调试和使用	68
5.1 安装安全注意事项	68
5.2 工业 CT 的安装与预调	69
5.2.1 土建施工	69
5.2.2 主体设备机械安装	70
5.2.3 主机设备电器安装	71
5.2.4 机电系统冷运行	72
5.2.5 X 射线机出束试验和正式运行前的辐射安全检查	72
5.2.6 探测器-准直器位置的进一步调整	72
5.3 工业 CT 系统的精细调整	73
5.3.1 探测器效率校正	73
5.3.2 DR 扫描流程和工业 CT 各种扫描流程调试	74
5.3.3 旋转中心位置的确定——薄壁圆筒法	75
5.3.4 旋转中心在不同扫描位置下的校正	75
5.4 CT 系统总体性能指标测定和功能调试	75
5.4.1 工业 CT 切层位置的确定	75
5.4.2 CT 值的标准化处理和标定	76
5.4.3 功能调试和总体性能指标测定	77
5.5 工业 CT 运行操作	79
5.5.1 工业 CT 系统运行需要注意的事项	79
5.5.2 工业 CT 系统工作流程	80
5.6 工业 CT 的辐射安全措施	81

5.6.1 安全系统的构成	81
5.6.2 安全联锁及故障处理流程	83
5.7 工业 CT 测试结果的观测	83
参考文献	86
第 6 章 工业 CT 系统的选择和设计	87
6.1 工业 CT 系统的两类技术参数	87
6.2 空间分辨率和技术数据之间的关系	88
6.3 密度分辨率和技术数据之间的关系	91
6.4 选择 CT 系统时值得注意的几个问题	93
6.4.1 工件尺寸对系统性能的影响	93
6.4.2 探测器尺寸及数量的选择	95
6.4.3 测试技术指标时的技术条件	95
6.4.4 三维图像重建和三维反演技术的应用	95
6.4.5 DR 方法的有限检测能力	96
6.4.6 扫描方式的选择	96
6.5 工业 CT 系统设计举例	97
参考文献	101
中 级 篇	
第 7 章 CT 扫描数据采集技术	105
7.1 X 射线在物质中的能量转移	105
7.2 比释动能和 X 射线强度的估算方法	106
7.3 辐射探测器	108
7.3.1 工业 CT 用辐射探测器的主要特点	108
7.3.2 工业 CT 常用辐射探测器	109
7.4 探测器效率	114
7.4.1 量子转换效率	114
7.4.2 准直器	114
7.4.3 X 射线在探测器阵列中的能量沉积	116
7.5 辐射探测器测量数据的预处理	117
7.5.1 射线源强度的校正	117
7.5.2 辐射探测效率器的能量响应特性的校正	117
7.6 数据采集系统的电子电路	118
7.6.1 关于电子电路的基本考虑	118
7.6.2 电子电路的结构	118
参考文献	121
第 8 章 工业 CT 图像重建算法	122
8.1 预备知识	122
8.1.1 Radon 变换	123
8.1.2 Fourier 变换	123

8.1.3	中心切片定理	124
8.2	平行束投影的几种重建算法	126
8.2.1	直接 Fourier 变换重建算法	126
8.2.2	滤波反投影重建算法	126
8.2.3	Radon 反演算法	128
8.3	平行束投影的反投影滤波重建算法	129
8.3.1	一元函数的 Hilbert 变换	129
8.3.2	有限区间上的 Hilbert 逆变换	130
8.3.3	图像的 Hilbert 变换	130
8.3.4	图像的 Hilbert 变换图像与投影的关系	131
8.4	扇束滤波反投影重建算法	132
8.4.1	扇束扫描几何参数和坐标系统	132
8.4.2	扇束滤波反投影重建公式	133
8.5	RT 扫描模式的反投影滤波重建算法	135
8.5.1	转台多次偏置的 RT 扫描模式	136
8.5.2	转台单侧多次偏置的 RT 扫描的 DBP 公式	136
8.5.3	算法实现步骤	139
8.5.4	数值实验	139
8.6	迭代重建算法	142
8.6.1	CT 图像重建离散模型	143
8.6.2	离散模型的常用求解方法	144
8.6.3	代数重建算法	144
8.6.4	优化问题和 Richardson 迭代算法	146
8.6.5	EM 迭代算法	148
8.6.6	子集排序迭代算法	148
8.7	锥束 CT 重建算法简介	149
	参考文献	150
第 9 章	计算机仿真与 CT 伪像	152
9.1	计算机仿真	152
9.2	计算机仿真在工业 CT 中的应用	152
9.3	仿真头部模型和仿真数据的产生	153
9.4	物理相关性能的计算机仿真	156
9.5	CT 伪像的仿真实验	157
9.6	伪像形貌分类	158
	参考文献	159
第 10 章	CT 相关技术	161
10.1	三维图像的显示(可视化)方法	161
10.1.1	基于等值面的体绘制	163
10.1.2	直接体绘制	164

10.1.3	三维重建图像绘制中的关键技术	165
10.2	工业 CT 在反向工程和先进制造技术中的应用	167
10.2.1	逆向工程的概念	167
10.2.2	逆向工程的应用	168
10.2.3	逆向工程的一般过程	168
10.2.4	数据采集技术	169
10.2.5	CT 数据采集	169
10.2.6	CT 图像处理	170
10.2.7	基于 CT 检测的几何模型重建	171
	参考文献	174
第 11 章	相衬 CT	176
11.1	引言	176
11.2	X 射线的性质	177
11.3	相位和相位信号	178
11.4	相位衬度成像的原理和方法	178
11.5	非相干光源相位衬度成像的原理	180
11.6	相位衬度三维成像技术的发展	182
11.6.1	相位衬度三维成像的条件	183
11.6.2	相位衬度三维成像的基本原理	183
11.7	相位衬度成像的回顾和展望	185
11.7.1	相位衬度三维成像的理论发展	185
11.7.2	非相干光源相位衬度三维成像	186
11.7.3	纳米分辨相位衬度三维成像光学	186
11.7.4	散射衬度三维成像	186
11.8	结束语	187
	参考文献	187

人 门 篇

第 1 章 引 言

1.1 从“盒子里装的是什么”谈起

在 1895 年伦琴发现 X 射线以前,想要在不打开盒子的情况下看清盒子里放的东西,几乎是不可能的,除非盒子是用透明材料做成的。如今在车站或机场,不用打开旅客的行李进行安全检查,已经司空见惯了。

在人类的科学研究、生产活动乃至医疗诊断中,类似“不打开盒子看清盒子里的东西”的问题可以说是成千上万,随时可以碰到。这种技术用一个术语来概括,叫做“无损检测”。

“无损检测”这个术语最先出现在材料科学领域。因为任何材料严格地说都不是完美无缺的,所以人们在使用这些材料时,自然会想到材料内部不可避免存在的各种缺陷对它们的应用到底有没有影响,或者说有多大的影响。作为问题的第一步自然是首先要弄清缺陷的大小、形状、数量、位置以及它们的性质,也就是所谓“探伤”,然后才有可能进一步对缺陷的影响作出“评价”。

所谓“无损检测”首先是相对于“有损检测”来说的。例如,检测一块铸铁毛坯,要查清内部的气孔,将其一片片地锯开固然是一种办法;然而,这样做不仅费工费时,材料也因被彻底破坏而无法使用。人们当然不会百分之百地把每个产品都如此检查一遍,只能对于每种产品的不同批号、不同原料或者不同工艺进行抽样检查。在没有找到更好的方法以前,这种看似愚笨的方法对于大规模生产过程来说,也是一种办法,抽样检查的结果从统计学的观点看还是具有指导意义的。然而抽样方法的检测毕竟只具有统计意义,并不能完全代表未经检测的那些产品的质量,抽样的比例越小代表性越差。这样的检测方法对于重要性一般的产品,对于那些损坏后仅仅会造成有限经济损失的产品是可以接受的;如果对于重要性高的材料或零件,致命的缺陷可能意味着严重的后果。例如,飞机上小小零件的损坏很可能带来机毁人亡的重大事故,这时抽样检测方法就显得可靠性不够了。人们显然需要寻找更好的非破坏检测方法,也就是“无损检测”方法,它不仅节约成本,还能保证所使用的材料或零件具有更高的可靠性。

1.2 用未知数 X 定义的射线

1895 年 11 月 8 日傍晚,伦琴在维尔茨堡大学物理研究所大楼进行阴极射线实验时,无意中发现放在 2m 远处的一个小工作台上的荧光屏在闪烁。他没有放过这一现象,又重复了多次类似实验,结果荧光屏上出现了同样的闪光。因为阴极射线(即电子束)不可能穿越几厘米的空气,更不可能使放在 2m 处的荧光屏发光,伦琴认为,这是一种与红外

线、可见光线以及当时已经知道的紫外线完全不同的射线,并给这种新发现的射线取了一个有点神秘的名字——X 射线。在他的研究报告中指出,X 射线与阴极射线并不相同,它是由放电设备的玻璃管壁上的阴极射线所产生的,同时指出:“X 射线是直线传播的”。他发现 X 射线能够透过一般光线不能透过的物质,并使照相底片感光。进一步的研究发现,几乎一切物质对这种射线都是或多或少透明的。以后,他制成了世界上第一个 X 射线管。由于这些重大发现,1901 年伦琴荣获世界首次颁发的诺贝尔物理学奖。后来为了纪念伦琴,很多人把 X 射线也称为伦琴射线。

X 射线具有穿透物体并且能使胶片感光的能力被人们认识以后,很快被用到医学的临床诊断,于是产生了 X 射线透视和拍片的方法。当然人们也会自然而然地想到把 X 射线的这种性质应用到其他方面,也包括用到材料检测上。这样就逐渐形成了无损探伤或者叫无损检测这门技术,后来又产生了利用超声、声发射或涡流等的检测方法其他分支。利用 X 射线的探伤方法也扩展到利用 γ 射线或中子等其他辐射线的探测方法,利用 X 射线等辐射线的这一类无损检测技术又进一步统称为“射线无损检测技术”,利用 X 射线和胶片的检测方法简称胶片照相。人们可以不必再将材料破坏而窥视材料内部结构,至于说到在不打开盒子的情况下看清盒子里放的东西就更是轻而易举了。

1.3 无胶片照相技术

用胶片进行 X 射线照相的方法在 20 世纪发挥了很大的作用,它是除了以后出现的超声检测方法以外,应用最为广泛的一种无损检测技术。直至 21 世纪的今天,虽说从技术上有许多进步,但是胶片照相这种传统的检测方法仍随处可见。

然而胶片照相方法也有明显的缺点,首先,胶片曝光以后要经过显影、定影和晾干等过程才能看到检测结果,实时性差;其次,由于胶片本身质量以及显、定影过程的控制,检测结果容易受到各种外界因素的影响;再次,要消耗大量的贵金属——银;最后,显、定影过程中大量使用的化学试剂还会引起环境污染问题。随着时代发展,这些过程必然要带来越来越高的经济成本。另外还有无法直接使用计算机技术管理、存储、传输以及处理图像,只有将胶片经过图像数字化处理,才能生成计算机可以识别的数字化图像。这在当今信息化时代,也是一个主要的缺陷。

不用胶片的照相技术可以说与胶片照相技术是同时产生的。其实最初发现 X 射线就是从荧光屏上“感觉”到了它的存在。这种直接荧光方法发展为医生在黑房间里的荧光屏前直接用肉眼检查病人的透视技术,直到 20 世纪末才基本退出历史舞台。其主要问题除了图像太暗以外,医生不可避免地会受到对人体健康有害的 X 射线的过量照射。透视技术的这种问题在工业应用的场合更为严重。

鉴于上述原因,各种其他无胶片照相技术纷纷出现。其中具有重要影响的是图像增强器的应用和近年来出现的计算机放射成像(computed radiography, CR)技术。图像增强器是一种真空器件,X 射线穿透被检测物体形成的图像在输入屏上,先由输入闪烁屏转换为可见光图像,再激发光电阴极发射电子,这些电子被高压电场加速后聚焦在输出屏

上,在此过程中图像信号得到了很大增强,最后用 CCD(charge coupled device, 电荷耦合器件)摄像机或其他输出设备输出。这样检测人员就可以在远离射线的地方实时地进行观测。近年来又出现了专门的成像平板探测器,图像质量比图像增强器更好,关于这些器件将在后面详细介绍。CR 系统与胶片成像的主要区别是用一块涂有一种称为光激发光物质的成像板来代替胶片,当成像板受到 X 射线照射时,会形成潜影,再用激光去照射已形成的潜影时,可以发生“光激发光”,将其转换成电信号被记录下来作进一步处理。CR 的成像板可以反复使用,图像分辨率接近于胶片的水平,但是图像的层次比胶片好,另一个突出优点是能够直接得到数字化图像,便于计算机处理。CR 技术目前主要还是应用于医学领域。

1.4 “要把西瓜切开才能看清楚”

无论是胶片照相,还是上述的无胶片照相技术都有一个共同的特点,即本来是三维的实际物体,得到的检测图像却是二维的。

我们生活在一个三维的空间里,肉眼所看到的周围的一切都是立体的。在这里我们不去讨论立体的图像在人眼里是如何形成的。如果我们用手去摸一个物体,这时手上的感觉和眼里看到的形象是对应一致的。

但是如果你看到的是一张照片,情况就不一样了。这时三维的立体图像被压缩到一个二维的平面上,如图 1.1 的塑料小文具盒照片。仅从顶视一个方向拍摄的照片上不容易想象出被摄物体的原貌,只有增加另外的视角才能知道这个物体确切的样子。有点像平常机械加工的图纸,一个工件通常都要用多个视图才能表达清楚,但是不规则的复杂形状物体就不那么简单了。前面所说 X 射线胶片照相的图像的情况还要更加复杂一点,由于 X 射线几乎能够透过所有的材料,射线经过路径上的所有物体轮廓都要重叠在一起,如图 1.2 所示是一个硬盘驱动器透视照片。如果检测那些事前对内部结构一无所知的物体,想要识别内部的结构就难上加难了。

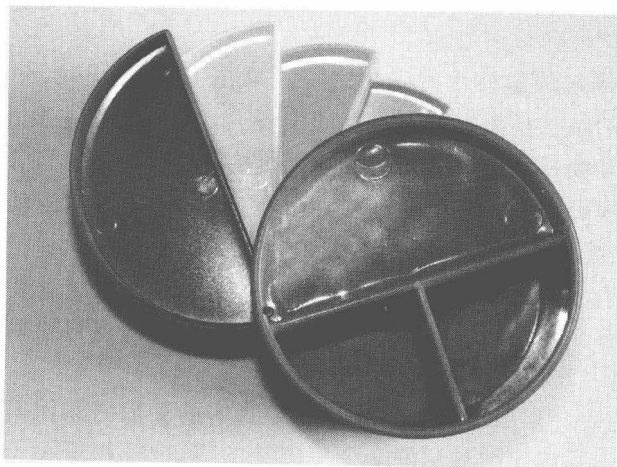


图 1.1 塑料小文具盒照片(顶视)

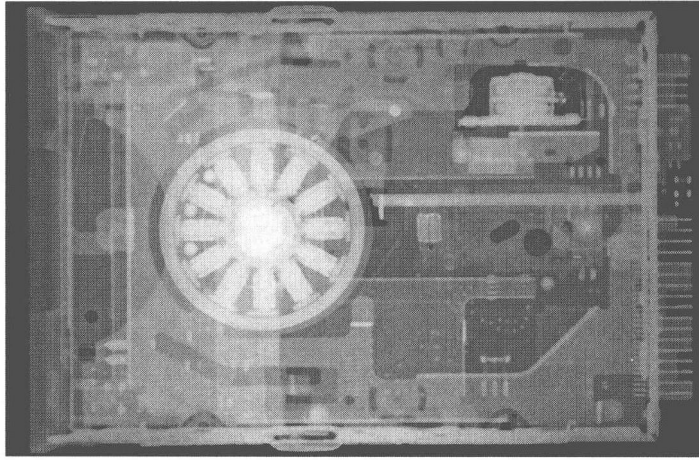


图 1.2 一个硬盘驱动器透视照片

最好的办法自然是仅拍摄感兴趣的那些剖面的图像,同时不受平面以外物体的干扰。这个问题就好像要知道一个西瓜里各个层面上有多少瓜子一样。我们似乎又回到了想要看清盒子里所装东西的问题。其实我们已经向前走了一大步,有了 X 射线我们已经不用打开盒子就可以知道盒子里的东西了,也就是说我们已经看见了西瓜里的瓜子。现在的问题是它们的图像重叠在一起,无法知道每个瓜子的确切位置。难道要把西瓜切开才能看得清楚吗?

1.5 传统断层成像技术

断层成像就是产生物体剖面的图像。通俗的比喻就好像把西瓜切开而看到的西瓜的断面。断层成像在现代英语里是 tomography^[1],来源于希腊语 tomo 一词。只是在无损检测领域里是不能把任何被测物体“切开”的。

Bocage 是传统断层成像技术的先驱之一。早在 1921 年 Bocage 描述了如下能使感兴趣平面以外上下的结构模糊得看不清楚的设备^[2]。他的发明主要由 X 射线管、X 射线胶片以及确保管子和胶片同步运动的机械连接机构等部件组成。图 1.3 说明了传统断层成像的原理。X 射线管自左向右运动,胶片则从右向左相反方向运动。调节好两者的运动速度,就可以使选定焦平面上的点 A 和 B 在胶片上的成像位置保持不变;另外,当 X 射线管左右移动时,不在焦平面上的点 a 或 b 在胶片上的成像位置就要不断移动。这样就使焦平面上的结构得到了清晰的图像,而焦平面以外的结构变得模糊。上述方法习惯上称为“传统断层成像技术”。

从理论上说,这种断层成像的焦平面是一个真实的平面。然而紧靠焦平面的那些平面仅有轻微的模糊。可以事前规定好某个模糊量的值,把模糊量小于规定值的区域定义为焦平面,或称为切片。于是“切片厚度”由“掠过角” α 决定,如图 1.4 所示。事实上切片厚度反比于 $\tan(\alpha/2)$,只有 α 足够大时才能得到足够小的切片厚度。