



计算机层析成像检测

《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会 编

国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材

计算机层析成像检测

《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会 编

主 编 叶云长

主 审 王自明 倪培君



机械工业出版社

本书是无损检测人员Ⅱ、Ⅲ级培训教材之一，主要介绍了工业CT技术的物理基础、数学基础，工业CT系统的组成，工业CT的图像质量，检测工艺要点，检测标准，质量控制，射线防护等知识，还例举了工业CT检测的应用实例。

本书对从事工业CT检测的技术人员有较好的指导作用。

图书在版编目(CIP)数据

计算机层析成像检测/《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会编. —北京:机械工业出版社, 2006.1

国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材

ISBN 7-111-17277-9

I. 计... II. 国... III. 计算机应用—无损检验—技术培训—教材 IV. TG115.28

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第097252号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:吕德齐

责任印制:杨曦

北京机工印刷厂印刷

2006年1月第1版第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·7.75印张·186千字

0 001—4 000册

定价:18.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68326294

封面无防伪标均为盗版

编审委员会

主任 马恒儒

副主任 陶春虎 郑鹏

成员 (以姓氏笔画为序)

王自明 王任达 王跃辉 史亦韦 叶云长 叶代平 付洋
任学冬 吴东流 吴孝俭 何双起 苏李广 杨明纬 林猷文
郑世才 徐可北 钱其林 郭广平 章引平

审定委员会

主任 吴伟仁

副主任 徐思伟 耿荣生

成员 (以姓氏笔画为序)

于岗 王海岭 王晓雷 王琳 史正乐 任吉林 朱宏斌
朱春元 孙殿寿 刘战捷 吕杰 花家宏 宋志哲 张京麒
张鹏 李劲松 李荣生 庞海涛 范岳明 赵起良 柯松
宫润理 徐国珍 徐春广 倪培君 贾慧明 景文信

编委会办公室

主任 郭广平

成员 (以姓氏笔画为序)

任学冬 朱军辉 李劲松 苏李广 徐可北 钱其林

序 言

无损检测技术是产品质量控制中不可缺少的基础技术。随着产品复杂程度的增加和对安全性保证的严格要求,无损检测技术在产品质量控制中发挥着越来越重要的作用,已成为保证军工产品质量的有力手段。无损检测应用的正确性和有效性,一方面取决于所采用的技术和设备的水平,另一方面在很大程度上取决于无损检测人员的经验和能力。无损检测人员的资格鉴定是指对报考人员正确履行特定级别无损检测任务所需知识、技能、培训和实践经历所作的验证;认证则是对报考人员能胜任某种无损检测方法的某一级别资格的批准并作出书面证明的程序。对无损检测人员进行资格鉴定是国际通行做法。美国、欧洲等发达国家都建立了有关无损检测人员资格鉴定与认证标准。国际标准化组织 1992 年 5 月制定了国际标准 ISO 9712,规定了人员取得级别资格与所能从事工作的对应关系,通过人员资格鉴定与认证对其能力进行确认。无损检测人员资格鉴定与认证对确保产品质量的重要性日益突出。

改革开放以来,船舶、核能、航天、航空、兵器、化工、煤炭、冶金、铁道等行业先后开展了无损检测人员资格鉴定与认证工作,对提高无损检测人员素质,确保产品质量发挥了重要作用。随着社会主义市场经济体制不断完善,国防科技工业管理体制深化改革逐步深化,技术进步日新月异,特别是高新技术武器装备的科研、生产对质量工作提出新的更高要求,现有的无损检测人员资格鉴定与认证工作已经不能适应形势发展的要求。未来十年是国防科技工业实现跨越发展的重要时期,做好无损检测人员资格鉴定与认证工作对确保高新技术武器装备研制、生产的质量具有极为重要的意义。

为进一步提高国防科技工业无损检测技术保障水平和能力,国防科工委《关于加强国防科技工业技术基础工作的若干意见》提出了要研究并建立与国际惯例接轨,适应新时期发展需要的国防科技工业合格评定制度。2002 年国防科技工业无损检测人员的资格鉴定与认证工作全面启动,各项工作稳步推进;2002 年 11 月正式颁布 GJB 9712—2002《无损检测人员的资格鉴定与认证》;2003 年 8 月出版了《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试大纲》;2003 年 9 月国防科工委批准成立国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证委员会,授权其统一管理和实施承担武器装备科研生产的无损检测人员资格鉴定与认证工作,标志着国防科技工业合格评定制度的建立开始迈出了重要的一步。鉴于国内尚无一套能满足 GJB 9712 和《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试大纲》要求的教材,为了做好国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考核工作,国防科工委科技与质量司组织有关专家编写了这套国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材。

本套教材比较全面、系统地体现了 GJB 9712—2002《无损检测人员的资格鉴定与认

证》和《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试大纲》的要求，包括了对无损检测 I、II、III 级人员的培训内容，以 II 级要求内容为主体，注重体现 III 级所要求的深度和广度，强调实际应用；同时教材体现了国防科技工业无损检测工作的特色，增加了典型应用实例、典型产品及事故案例的介绍，并力图反映无损检测专业技术发展的最新动态。全套教材共 11 册，包括《无损检测综合知识》、《涡流检测》、《渗透检测》、《磁粉检测》、《射线检测》、《超声检测》、《声发射检测》、《计算机层析成像检测》、《全息和散斑检测》、《泄漏检测》和《目视检测》。

由于无损检测技术涉及的基础科学知识及应用领域十分广泛，而且计算机、电子、信息等新技术在无损检测中的应用发展十分迅速，教材编写难度较大。加之成书比较仓促，难免存在疏漏和不足之处，恳请培训教师和学员以及读者不吝指正。愿本套教材能够为国防科技工业无损检测人员水平的提高和促进无损检测专业的发展起到积极的推动作用。

本套教材参考了国内同类教材和培训资料，编写过程中得到许多国内同行专家的指导和支持，谨此致谢。

“国防科技工业无损检测人员
资格鉴定与认证培训教材”编审委员会
2005 年 6 月

前 言

根据“国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试培训教材”的编写要求，我们承担了《计算机层析成像检测》教材的编写任务，并贯彻以下编写原则：一是紧密围绕考试大纲，强调解决实际问题；二是突出体现国防科技工业无损检测工作特色，适当增加典型应用及案例的介绍；三是教材内容编排应按照基础理论、相关标准、编制检测规程和实验与操作四大部分安排章节。

本书共设9章。第1章针对本专业涉及的物理基础知识给出较详细的阐述；第2章着重阐述了计算机层析成像检测的原理，前两章是本专业检测技术的理论基础；第3、4、5章分别详细阐述了计算机层析成像检测系统设备、器材、检测技术的基本方法、操作程序；第6章简要介绍实际应用案例，使读者了解本专业技术的应用范围和各种检测案例的特殊性；第7、8章介绍本专业使用的国内外标准和规程及工业CT检测的质量控制，介绍了编制相关标准、规程的原则和方法，以使本专业检测技术规范化，提高检测技术水平；第9章介绍射线防护基础知识，正确认识射线辐射的危害性和安全防护的必要性。

本书第1章由郑世才编写，第2章由叶云长、付洋、冯树文编写，第3章由叶云长编写，第4章由叶云长、付洋编写，第5章由叶云长编写，第6章、第7章、第9章由叶云长、倪培君编写，第8章由叶云长、郑世才编写。全书由叶云长主编，倪培君、王自明主审，张朝宗、吴东流、孙灵霞等参加了审定。

各级检测人员培训时，教学内容可根据《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考核考试考试大纲》适当增减。目录中带“*”号的章节内容对II级人员不作要求，对III级人员只要求作一般了解。

本教材在编写过程中，除了参考了一些国内外相关的专著及文献等资料外，还特别引用了我国老一代工业CT专家李时光、先武、冯树文、张朝宗等编著的工业CT技术，同时也参考了航空、航天、船舶、核工业等内部培训教材，编写组对有关作者表示衷心感谢。此外，教材也写入了编写组多年从事工业CT检测工作积累的经验和在培训教学中的一些体会。

限于编者水平，错误和疏漏恐在所难免，热诚欢迎培训学员、培训教师、读者提出宝贵意见。

《计算机层析成像检测》编写组

2005年7月

目 录

序言
前言

绪论 工业 CT 发展概况 1

 复习题 7

第 1 章 X 射线工业 CT 技术的物理基础知识 8

 1.1 原子结构 8

 1.1.1 原子结构的行星模型 8

 1.1.2 原子核 9

 1.1.3 放射性与放射性衰变 10

 1.2 射线概念 12

 1.2.1 射线分类 12

 1.2.2 X 射线与 X 射线谱 13

 1.2.3 γ 射线 16

 1.2.4 X 射线与 γ 射线的主要性质 17

 1.3 光子与物质的相互作用 18

 1.3.1 光电效应 18

 1.3.2 康普顿效应 18

 1.3.3 电子对效应 19

 1.3.4 瑞利散射 20

 1.4 射线衰减规律 20

 1.4.1 基本概念 20

 1.4.2 单色窄束射线衰减规律 21

 1.4.3 宽束连续谱射线的衰减规律 24

 复习题 26

第 2 章 工业 CT 技术数学基础知识 27

 2.1 CT 的基本思想 27

 2.2 Radon 变换及其逆变换 28

 2.3 图像重建原理的基本概念 30

 *2.4 反投影重建法的物理概念 31

 *2.5 卷积反投影法 34

 2.5.1 卷积反投影法的基本概念 34

 2.5.2 卷积反投影法的实现 35

 *2.6 平行束卷积反投影法 36

 2.6.1 反投影法的图解说明 36

 2.6.2 反投影法的分析 36

 *2.7 扇形束卷积反投影法 36

 2.7.1 扇形束数据采集的几何结构 37

 2.7.2 实现图像重建的基本思想 37

 2.8 CT 值 38

 复习题 38

第 3 章 工业 CT 系统组成 40

 3.1 射线源 41

 3.1.1 γ 射线源 42

 3.1.2 X 射线源 42

 3.1.3 γ 射线机 45

 *3.1.4 直线加速器 45

 3.2 射线准直器 48

 3.3 机械扫描系统 48

 3.3.1 机械扫描系统结构 48

 3.3.2 CT 装置的分代 49

 3.4 探测器系统 51

 3.4.1 探测器的特性 51

 *3.4.2 探测器种类、工作原理
 及特点 51

 3.5 数据采集系统 53

 3.6 计算机系统 53

 3.7 工业 CT 系统性能参数 53

 3.7.1 工业 CT 装置的主要
 性能指标 53

 3.7.2 分辨率 54

 复习题 55

第4章 工业CT的图像质量	57	7.3 标准规定的工业CT系统性能 测试方法.....	89
4.1 工业CT图像的一般特点.....	57	7.3.1 空间分辨率的测试.....	89
4.2 工业CT图像质量的性能指标 及影响因素.....	58	7.3.2 密度分辨率的测试.....	91
4.2.1 空间分辨率.....	58	7.4 工业CT系统实际检测能力测试.....	93
4.2.2 密度分辨率.....	60	7.5 工业CT系统设备检定.....	93
4.2.3 伪像.....	62	7.6 检测记录和报告的编制.....	93
4.3 工业CT图像质量的测试方法.....	63	7.6.1 检测记录.....	93
4.3.1 试样.....	63	7.6.2 检测报告.....	94
4.3.2 空间分辨率测试.....	64	复习题.....	94
4.3.3 密度分辨率测试.....	64	第8章 工业CT检测的质量控制	96
复习题.....	65	8.1 全面质量管理概念.....	96
第5章 工业CT检测工艺要点	66	8.2 质量保证体系概念.....	97
5.1 检测工件穿透厚度估算.....	66	8.3 工业CT检测的质量概念.....	98
5.2 CT系统工作模式选择.....	67	8.3.1 工业CT检测人员管理.....	98
5.3 准直器选择.....	67	8.3.2 工业CT检测设备和器材管理.....	99
5.4 图像处理和分析.....	68	8.3.3 工业CT检测工艺质量管理.....	100
5.5 CT检测工艺卡编制.....	68	8.3.4 工业CT检测实验室管理.....	102
5.6 工业CT检测一般操作流程.....	69	8.3.5 工业CT检测工艺卡编制.....	102
5.7 功能及使用方法.....	72	复习题.....	103
复习题.....	80	第9章 射线防护基础知识	104
第6章 工业CT应用实例	81	9.1 辐射的生物效应.....	104
6.1 工业CT在无损检测中 的应用特点.....	81	9.2 照射损伤.....	104
6.2 工业CT在无损检测中 的应用举例.....	82	9.3 射线防护标准.....	105
6.2.1 缺陷检测.....	82	9.3.1 射线防护的基本原则.....	105
6.2.2 几何尺寸测量.....	85	9.3.2 我国射线防护标准的 有关规定.....	106
6.2.3 密度分布特征.....	86	9.4 射线防护方法与监测.....	107
6.3 工业CT在反馈工程中的应用.....	86	9.4.1 外照射的基本防护方法.....	107
复习题.....	87	9.4.2 防护计算.....	108
第7章 检测标准	88	9.4.3 射线防护监测.....	110
7.1 标准对工业CT检测人员要求.....	88	复习题.....	111
7.2 标准对环境条件要求.....	88	附录	112
		参考文献	113

绪论 工业 CT 发展概况

1895 年 11 月，德国匹兹堡大学教授伦琴在研究阴极射线时，发现了一种新的光线。这种光线人眼看不见，但却能在漆黑的地方穿过不透明的物体进行照相。当时伦琴尚未搞清这种光线的性质，所以给它取名为 X 射线。

1896 年法国科学家贝克勒尔在研究磷光现象时，发现了一种与 X 射线性质相似的不可见光线，称为 γ 射线。试验表明，它的强度与试样中的含铀量成正比，从而确认了天然放射性物质的存在。两年后，居里夫妇用放射化学的方法，从铀矿中又分离出一种放射性强度比铀大得多的新放射性物质——镭。从而奠定了放射性化学与物理的研究基础。

在 X 射线被发现的同时，射线检测技术便应运而生。最初的、也是最常见的射线检测技术是指 X 射线胶片照相技术 (RT)。随着科学技术的不断进步，又相继出现了 γ 射线照相、中子射线照相、高能 X 射线照相、数字射线照相 (DR)、X 射线实时成像 (RTR) 以及计算机层析成像 (Computed Tomography 或 Computerized Tomography)，简称 CT。

1972 年英国科学家 G.Hounsfield 博士研究了计算机层析成像 (Computed Tomography) 技术，研制出了世界上第一台 CT 系统，获得了人体清晰的断层图像，从此 CT 技术开始用于医疗诊断。工业 CT (Industrial Computed Tomography) 检测技术在工程中的应用始于 20 世纪 70 年代末，美国航天实验室为了解决火箭贮氢柜在重复使用过程中可能出现的裂纹问题，耗资 3000 万美元建造了两台 ICT 机，其中一台检测了 34 个贮氢柜，发现 14 个有氢腐蚀裂纹，成为工业 CT 早期在工程领域应用的成功范例。

由于工业 CT 检测的对象涉及工业过程中的各个领域，因而对工业 CT 系统的密度分辨率、空间分辨率、动态范围等技术指标的要求比医用 CT 更高。需要的射线源能量分布较广，可能在 120keV~60MeV 之间变化。如：用于大型重工件检测的工业 CT 系统，可以检测 4m 直径的火箭发动机 (图 0-1)；配置高能加速器的工业 CT 系统，有的使用了 60MeV 直线加速器 (图 0-2)。用于检测航天飞机的固体火箭发动机。目前，在我国使用较多的工业 CT 系统，其能量分布在 120keV~2MeV 之间，其中配置 120keV 微焦点 X 射线机的工业 CT，由于检测视场小，空间分辨率可达 30 lp/mm。随着工业 CT 技术的发展及为了拓展工业 CT 的检测范围，有些工业 CT 系统采用了双源配置，比如 X 射线机+直线加速器，但这对数据获取系统的能量响应动态范围有较高要求。

国内 20 世纪 90 年代初开始引进和研究工业 CT 技术，应用技术的研究则更晚一些。国内从事工业 CT 技术研究的方向大致可以分为两类：一类是直接购买国外技术，包括硬件和软件，进行集成；另一类是利用国内现有资源，自己开发工业 CT 的核心成像系统，包括数据采集系统、图像重建及图像分析软件。目前，国内已研制出了 420keV X 射线机工业 CT 及 2~9MeV 系列高能工业 CT 系统，并已用于工业产品检测。

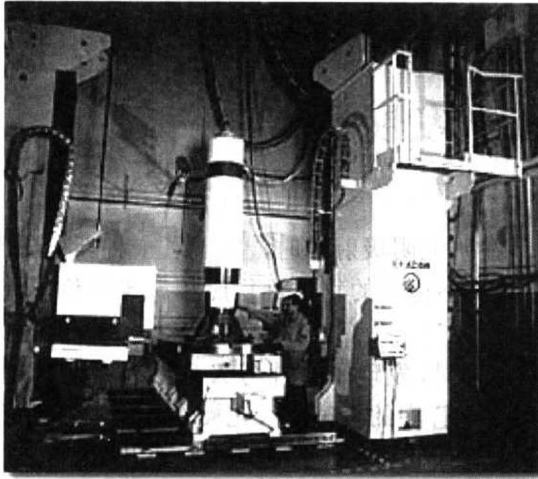


图0-1 可检测4m 直径的 CT 系统

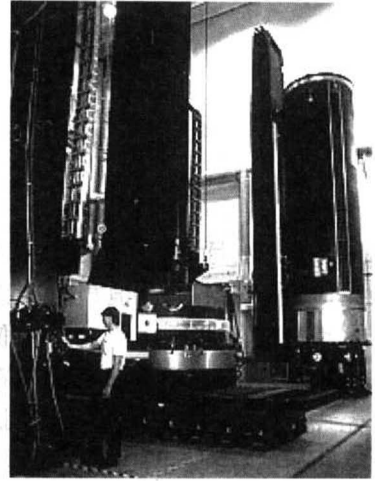


图0-2 60MeV 直线加速器 CT 系统

射线照相或胶片成像是将三维物体变为二维图像，不可避免地存在着信息叠加，从而导致被检缺陷空间位置分布、形状与大小及几何尺寸难以精确测量（见图 0-3）。

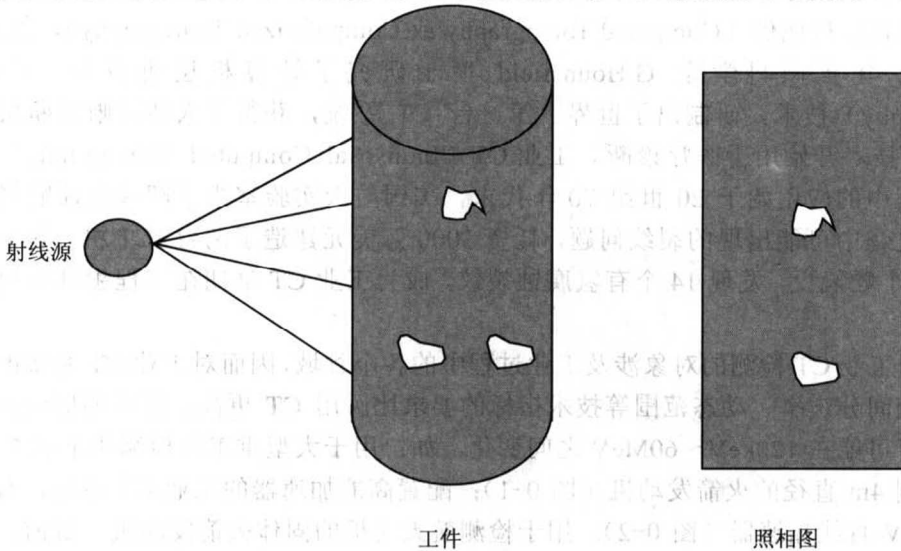


图0-3 常用射线检测示意图

工业 CT 是将物体的二维断面变为二维 CT 图像，不存在信息叠加，因而能准确判定被检缺陷的空间位置分布、形状、大小，进而精确测量其几何尺寸（见图 0-4）。

另外，工业 CT 具有突出的密度分辨率能力，高质量的 CT 图像密度分辨率可达到 0.1% 甚至更高，比常规射线检测技术高一个数量级。采用高性能探测器的工业 CT，探测信号的动态范围可达 10^6 以上，远高于胶片和图像增强器。工业 CT 图像是数字化的结果，从中可以直接给出 CT 值、像素尺寸等物理信息。数字化图像便于存储、传输、分析和处理等。

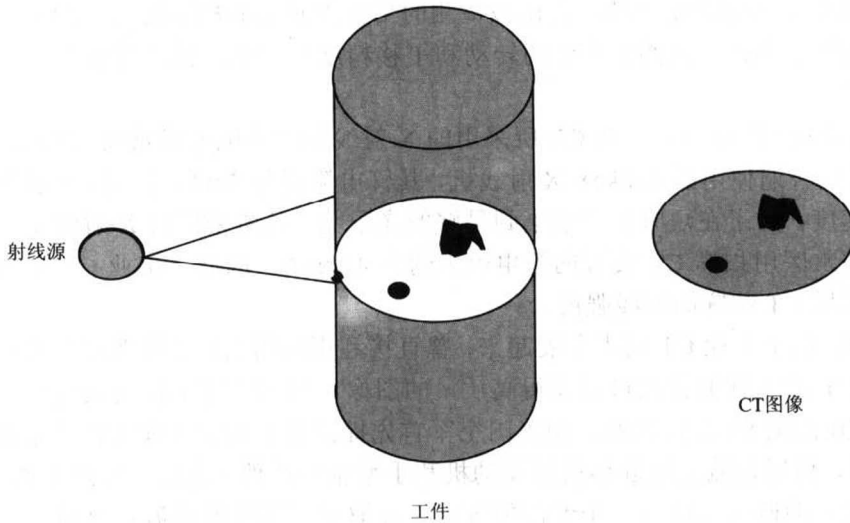


图0-4 工业 CT 检测示意图

工业 CT 装置与医用 CT 装置工作原理是一样的，但又有一些区别，主要表现在以下几个方面。

1) 扫描方式不同。通常医用 CT 装置按扫描方式可分为五代。第五代叫做动态扫描 CT 机，20 世纪 80 年代中期才开始普及。其特点是扫描速度快，仅需 50~100ms 即可获得一幅层析图像，适用于心脏等运动器官的扫描。医用 CT 装置的更新换代，主要是为了缩短获得图像的时间和提高检测的精度。扫描时间并不作为工业 CT 最重要的技术指标，其发展方向主要致力于提高空间分辨率和密度分辨率，以达到检测各种类型工业产品缺陷的精确度要求。因此，在目前发展阶段，工业 CT 装置扫描方式仍以第二代和第三代两种扫描方式为主，有的实验装置甚至采用第一代扫描方式。

2) 射线源能量不同。由于医用 CT 的检测对象是人体，而人体对 X 射线衰减远比工业产品弱，因此，医用 CT 装置所采用的射线能量相对较低。为了保护人体免遭射线辐射伤害，一方面需尽量缩短扫描时间，另一方面不采用放射性同位素源，如 ^{60}Co ，而代之以低电压的 X 射线源。一般管电压在 150kV 以下，以避免杀伤人体的细胞。对于工业 CT 装置，为了穿透大厚度的产品，必须采用高能量的射线源，因此，即使是一般的 X 射线机，其管电压也常用 420kV，这种高电压在医用上从来就不采用。而且医用上通常是用脉冲式 X 射线管，而工业上则常用恒电势 X 射线管，即输出功率恒定不变。在工业 CT 检测中，对于高密度、极大厚度的工件，采用更高能量的射线源，如 ^{60}Co 和 15MeV 的高能直线加速器。同位素 γ 辐射源虽具有单能级等突出优点，但其焦点尺寸较大，放射性强度小，安全性能较难控制，因此应用范围不如 X 射线普遍。

3) 结构方式不同。工业 CT 装置与医用 CT 装置相比较，在结构上也有显著的区别。现代医用 CT 都是保持病人静止，因而都有相当庞大的装有复杂机电设备的运动部件。这是为了使病人不致在运动中受到振动、冲击等伤害。工业 CT 装置就完全不同了，它可以把产品固定在工作台上，任其作旋转和平移运动，所以工业 CT 装置一般是使射线

源和探测器系统保持静止不动，而由被检测的工件作必要的扫描运动。但是，由于工业 CT 检测精度要求高，试件工作台的转动和平移精度要求高，故工作台是一个十分精密的关键部件。

4) 射线源强度不同。工业 CT 所采用的 X 射线源的管电流常常仅有几毫安，例如，工业 CT 系统普遍使用的 420keV X 射线机，其管电流仅为 2mA。医用 CT 装置需具有较快的扫描速度，为了在短时间内采集到足够的光子数，其所采用的 X 射线源的管电流相对较大，通常医用扫描 CT 装置的管电流大约为 150mA。因此，工业 CT 装置的射线强度远小于医用 CT 装置的射线强度。

在早期，由于工业 CT 还未发展起来，曾直接利用医用 CT 装置来对工业产品进行检测。医用 CT 对人体的检测可以获得高质量的图像，但不适用于检测大尺寸、高密度的物体。从 20 世纪 80 年代开始，由美国空军首先提出若干研究工业 CT 的计划来研制工业 CT 装置，用以检测大型固体火箭发动机和小型精密铸件。之后，经过大约 15 年的发展，工业 CT 的研究已成为一个专门的分支，并取得了飞速的发展。目前，工业 CT 已在航天、航空、军事工业、核能、石油、电子、机械、考古等领域得到广泛应用。世界上许多国家都投入了大量的人力、物力对其开发研究，其发展方向可归结为以下几方面：

1) 工业 CT 成像方法研究。工业 CT 在许多结构技术与性能技术方面借鉴于医用 CT，充分利用了医用 CT 装置在原理、结构工艺、扫描技术方面的许多成果，同时又根据工业 CT 检测的特殊性，要求更高的空间分辨率和密度分辨率。因此，在实际制造工业 CT 的过程中，所遇到的问题，比医用 CT 还多。工业 CT 目前已获得广泛的应用。对于应用中碰到的问题，又在不断地改进和完善。下面简单介绍在近几年工业 CT 在成像技术方面的发展动向。

① 康普顿背散射成像技术。康普顿背散射层析成像技术与传统的透射系统相比，其显著特点在于 X 射线源及探测器系统处在被检试件的同一侧，而不是分置于被检试件的两侧，这样就不用穿透整个被检工件。这一特点对于检测那些大而厚的工件，或者无法从内部检测的大型焊接产品和密封发动机等具有特别重要的意义。对这些特殊产品往往只对离表面数毫米以内的结构状况感兴趣，而对深层的结构状态则无需进行检测。康普顿背散射成像技术的另外两个重要优点是适于低原子序数的材料，可以提供较高的反差，并且可以直接实现三维成像，并不需要复杂、费时的图像重建。因此，康普顿背散射成像系统也特别适用于航空工业中检测轻金属或复合材料结构件，比如蜂窝状结构件、粘接结构件等。近年来，已推出了康普顿背散射成像系统产品。该设备专门设计了旋转螺旋窄缝准直器产生笔形 X 射线束扫描，用 BGO 探测器阵列，采用焦点为 3mm×3mm 的普通探伤用 X 射线机，可以达到 0.4mm×0.4mm 面积分辨率及 0.4mm 的深度分辨。获得不同深度的 22 幅图像仅需 1.25~6.25min。

② 焦平面层析成像。医学诊断上早已有过所谓“焦平面层析成像技术”，其基本原理是使 X 射线与胶片相对于被检物体作反方向平移移动，控制两者的运动速度，使得被检断面上每一点在胶片上的投影位置保持不变，其他断面上的图像则由于射线源的移动而变模糊，从而形成所要观察的断面图像。这是一种经典方法，至今在医学上仍被采用。现在工业上用探测器线阵来代替胶片，用计算机计算焦平面上各点在不同图像上的位置

并处理数据。该方法对于在不同方向上几何尺寸相差较大而采用典型的 CT 装置难以检测的物体（如印制电路板）特别有效。

③ 模拟层析成像技术。另一种方法是直接利用胶片的工业层析成像技术(简称 FIT)。这里不是指胶片代替探测器线阵,而是将黑度值转换成数字后进行重建的技术,这是近年来发展起来的一种“模拟量”层析成像技术。焦平面层析成像所述的扫描方式,仅在一个方向上,使不在焦平面上的图像模糊。如果采用更复杂的运动轨迹来模糊不需要的图像则会得到更好的效果。最容易实现的当然是圆周运动。其基本原理是使 X 射线源与被检断面及胶片处在同一平面内,使胶片及物体以相同的角速度旋转,保证待测断面上每一点的投影固定在胶片对应的点上,而其他图像则在运动中被模糊。这种系统由于没有直接利用计算机,因此不能称为 CT,但其物理原理及几何布置都与近代 CT 十分相似。这种系统结构简单,价格比 CT 装置便宜,具有一定的应用价值。

④ 圆锥射束 CT 成像。它基本上与普通 CT 成像相同,但是,不用准直器对射线束进行准直而使其变成薄的扇形射束,利用面阵列探测器,接收整个圆锥形射束,每一个投影角度上的数据识别,包含了许多次一般 CT 的片状数据矩阵。物体绕着轴线旋转,以便进行多次的投影来对数据进行识别。对于圆锥射束 CT 而言,数据处理和图像重建比一般的 CT 更为复杂,根据建立的体积数据来观察多个平面内的图像。这种成像技术的优点在于:能够快速地对整个体积进行扫描,三维重建速度比线阵探测器 CT 快很多,并且在多个轴向位置进行扫描。这样,对整个体积进行 CT 研究节省了大量的时间和经费。

2) 高能 X 射线 CT 装置研制。一般工件的工业 CT 检测通常采用 X 射线源,目前应用较多的是 450kV 或 420kV 的 X 射线源 CT 装置,但该系统最大穿透等效钢厚度仅为 50~60mm。对于较厚的工件或较重元素材料的检测,如大型固体火箭发动机,大型钢铸件,则需用能量较高的直线加速器来产生高能射线。由于检测固体火箭发动机是早期发展工业 CT 装置的直接目的。20 世纪 80 年代初期就已经研制出了几个著名的工业 CT 系统,并都利用了高能直线加速器提供 16MeV 的 X 射线作为射线源,检测的固体火箭直径达 2~3m。对于稍低的能量范围,可利用加速器产生的 1MeV 或 2MeV 的 X 射线,代替 X 射线机或 ^{60}Co 放射性同位素源。近年来有关高能加速器工业 CT 的报道很多,其中使用工作电压最高的工业 CT 系统,应用了 60MeV 超高压直线加速器。这种系统可用于检测导弹和航天飞机助推器固体火箭发动机。

3) 同步辐射源 CT 装置研制。射线源是工业 CT 系统关键部件之一,由于连续谱 X 射线硬化对 CT 图像造成的不利影响,应用单色 X 射线源一直是 CT 科研工作者的愿望,因此,利用同步辐射单色 X 射线用作 CT 装置的射线源引起了普遍的兴趣。使用同步辐射源进行实验,除了单色性外,高强度、源点小、方向性好也是重要优点。

4) 移动式 CT 装置的研制。某些情况下探测对象既不能移动,也不可拆卸,因此移动式 CT 应运而生。移动式 CT 的特点是结构简单、造价低,易于在短时间内拆卸、搬运及安装,并且轻便(通常重几十到几百千克),用一辆中型汽车即可运往现场进行检测。在这种轻便系统中,大都采用放射性同位素源,比如 ^{192}Ir , ^{137}Cs 。用 NaI 和 CdWO_4 晶体做探测器,常用第二代 CT 扫描方式,探测器数量远少于固定式设备,大多采用小型

或微型计算机。当然这种系统的空间分辨率和密度分辨率等直接受放射源强度、尺寸、射束准直情况、测量时间、机械系统、加工精度等因素制约。对于使用中的柱子、电线杆以及石化管道等的工业 CT 检测，移动式 CT 具有相当大的应用潜力。

5) 软件技术的发展。

① 算法。迄今，卷积反投影法是最常用算法。该法图像质量高，同时主要由乘法运算组成，易于软件设计流水线作业方式的专门图像处理机。但是，关于算法的研究从未停止过，每年至少上百篇论文涉及 CT 的算法问题。直接傅立叶变换法由于大量用到指数运算，以往实用较少。近年来，因计算机技术的进步，这种算法又引起了关注。其他如利用 Linograms 和 Hankel 变换进行图像重建，从计算速度、图像质量等方面都至少可与卷积反投影法媲美。近年来，关于算法的研究主要都是围绕直接三维图像重建进行的。

② 射线硬化校正。CT 重建理论假定投影数据与衰减系数沿投影方向的线积分成正比，这在单能 X 射线情况下是成立的。实际应用中，往往采用了连续光谱的 X 射线源。由于低能射线比高能射线更容易被物体吸收，因此在射线穿透物质的过程中，平均能量逐渐变高，从而表现出衰减系数逐渐变小，使图像边缘的密度显得比实际的要高，影响了系统的密度分辨率。医用 CT 系统中的这个问题已在一定程度上得到了解决，对人体组织或类似组织的物质，硬化的影响已可减少到千分之几。然而工业零件经常由高密度材料组成，如金属陶瓷等，硬化的影响要严重得多。采用单能源（同步辐射或同位素源）是一种办法，但应用范围有限。用水袋或预先硬化的办法，使 X 射线连续谱的低频段能量衰减而使线谱变窄有一定效果，但不明显。目前研究较多且有最大潜力的方法是双能法，即利用两套不同能量的 X 射线光谱，经过一系列处理后，得到光电吸收系数与康普顿散射系数的分布，从而得到衰减系数的分布。这种方法的缺点是成本高、设备复杂、处理数据时间长。

③ 有限角度不完全数据成像技术。经典的 CT 重建技术要求投影数据是完备的。然而在实际条件下，由于 X 射线在某些方向不能透过产品或由于某些方向产品尺寸过大，不能得到该方向的投影数据。这些实际存在的问题总是要求人们对有限角度不完全数据的重建技术进行研究。目前常用的有三种方法：Clark-Plamer-Lawrence 插值法和 Reeds-Sheep 仿射变换法，这两种技术主要都是寻求一种坐标变换，使不完备的投影数据在变换后的坐标中达到完备，它们无需事先了解被检样品的性能；第三种方法称为凸面投影法，是目前最常用的，其要点是通过书籍数据，如产品的尺寸和衰减系数范围等，提出产品性能的约束条件，用这些约束条件来修正人为假设的投影数据，通过反复迭代直到获得满意的 CT 图像。

④ 三维成像技术。CT 成像按其本意是显示断面的二维图像。但从检测要求来说，有时希望得到物体整个外貌或揭示其内部结构的三维图像。自 CT 技术广泛被应用以来，三维成像一直是人们研究的问题，总体上可分为两大类。一类是研究直接从投影数据进行三维重建，或称之为真三维重建技术。J.W.Kress 和 L.A.FeldKamp 用荧光屏上得到的两维投影数据实现了直接三维成像。近年来，三维直接重建问题是 CT 技术研究中最热门的课题。另一类是将多幅二维 CT 图像叠堆出产品的三维图像，这实际上是一种显示

技术,近年来这方面的技术发展很快,已有专门用于三维成像的商品化计算机软硬件,得到了相当广泛化的应用,其中,最为典型的是表面显示法。这是利用一族参数曲线的理论模型绘制技术用于表面重建的方法,后来又出现了各种三维显示技术,以表面显示法为例,先后出现了三角网法,得朗奈三角网法,有限差分法、动态弹性表面插入法和改进的动态弹性插入法。这些方法基本上都是利用有限的层析数据获得更加接近实际的光滑物体表面图像。近年来,又出现了滑形环连续螺旋线扫描方式,可以得到无间隙的螺旋状扫描数据,对三维显示技术无疑提供了十分有利的条件。

⑤ ICT-CAD 及 ICT-CAM 技术研究。将工业 CT 技术与计算机辅助设计 (CAD) 及计算机辅助制造 (CAM) 相结合,进行复杂产品的复制及新产品的设计开发的技术,称为 ICT-CAD 技术和 ICT-CAM 技术,目前已获得较大成功。它是利用工业 CT(简称 ICT)对工件二维层析成像和三维成像的特点,在不破坏工件的情况下,获取工件内部的结构尺寸、材料密度等信息;利用所获得的信息进行计算机辅助设计(简称 CAD);在此基础上,进行计算机辅助制造(CAM)。在条件允许的情况下,还可以采用激光烧结机直接用 CAD 的结果进行熔模烧结,再根据熔模进行铸造而获得原工件的复制件。

复 习 题

1. 常规射线检测技术与 CT 检测技术的本质差别是什么?
2. 工业 CT 装置按什么原则进行分代?
3. 叙述二代 CT 和三代 CT 的扫描方式及它们在工业 CT 检测中的特点。
4. 工业 CT 装置与医用 CT 装置的区别主要表现在哪些方面?
5. 产生射线硬化的机理是什么? 射线硬化在 CT 图像中的表现形式是什么?

第 1 章 X 射线工业 CT 技术的物理基础知识

1.1 原子结构

1.1.1 原子结构的行星模型

自然界的物质都是由不同的分子组成的，分子由原子组成。原子是一种非常小的物质粒子，直径大约是 10^{-10}m 。直到 19 世纪末，人们一直认为原子是组成物质的最小微粒，它是不能再分割的。19 世纪末 20 世纪初物理学的许多新发现，揭示了原子是可以分割的，并且原子具有自己的结构。

原子由质子、中子和电子组成。质子是一种物质微粒，其质量为 $1.6726 \times 10^{-27}\text{kg}$ ，带有一个单位的正电荷，电量为 $1.6021892 \times 10^{-19}\text{C}$ ，这个电量常简记为 e 。中子也是一种物质微粒，其质量为 $1.6748 \times 10^{-27}\text{kg}$ ，不带电荷。电子是一种更小的物质微粒，其质量为 $9.1095 \times 10^{-31}\text{kg}$ ，仅为质子质量的 $1/1836$ ，带有一个单位的负电荷。

关于原子结构曾提出过多种不同的模型。20 世纪初物理学家汤姆孙提出了一种“葡萄干面包”球体模型。这种模型假设原子是一个均匀的阳电球体，电子均匀地嵌在球体中，按一定频率围绕各自的平衡位置振动。由于与实验结果不符合，很快被抛弃。1911 年，物理学家卢瑟福根据 α 粒子散射实验，提出了原子的核式结构模型。他设想，原子中的带正电部分集中在很小的中心体内，即原子核，并占有原子的绝大部分质量，原子核外边散布着带负电的电子。这个模型很快被广泛接受，但核外电子的分布情况并不清楚。1913 年，物理学家玻尔在原子核式结构模型的基础上，提出了后人称为卢瑟福-玻尔原子模型的原子结构模型，即原子结构的行星模型。

在原子结构的行星模型中，原子由带正电荷 Z_e 的原子核和 Z 个核外电子组成， Z 为原子序数。原子核位于原子的中心，电子围绕原子核运动。但电子绕核运动的轨道不是任意的，也不能连续变化，电子只能沿一些分立的、满足一定条件的轨道运动，这些轨道称为量子轨道。

关于原子结构玻尔提出了两条假设：一是原子只能存在于一些具有一定分立能量 E_1 、 E_2 、 E_3 、 \dots 的稳定状态上。处于稳定状态的原子不辐射能量，只有在原子从一个稳定状态跃迁到另一个稳定状态时，它的能量才发生改变。这些稳定态对应的不连续的能量数值组成原子的能级。二是原子从能量为 E_n 的稳定态跃迁到能量为 E_m 的稳定态时，将发射或吸收一个一定频率 ν 的光子。频率由下式计算：

$$h\nu = E_n - E_m \quad (1-1)$$

式中 h ——普朗克常数，其值为 $6.626 \times 10^{-34}\text{J} \cdot \text{s}$ ；

ν ——辐射频率，单位是 Hz；