



“十一五”国家级重点图书
国防特色学术专著·航空宇航科学与技术

National Defense Monograph



锥束CT技术及其应用

张定华 黄魁东 程云勇 著

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



中国医学影像技术学会
CHINESE SOCIETY OF MEDICAL IMAGING AND INTERVENTION

2022年第11期 第36卷第11期



临床CT技术及其应用

第36卷第11期 2022年11月

中国医学影像技术学会
CHINESE SOCIETY OF MEDICAL IMAGING AND INTERVENTION
中国医学影像技术学会
CHINESE SOCIETY OF MEDICAL IMAGING AND INTERVENTION



“十一五”国家级重点图书
国防特色学术专著·航空宇航科学与技术

锥束 CT 技术及其应用

张定华 黄魁东 程云勇 著

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书以锥束 CT 技术的理论为基础,以其应用线索为组织体系,系统介绍了锥束 CT 的发展概况、最新研究进展及在工业领域中的具体应用。全书共分 9 章,重点介绍锥束 CT 的扫描系统、计算机仿真、图像重建、伪影校正,以及基于锥束 CT 的数字化检测中的轮廓提取、模型配准、尺寸测量、材质与缺陷分析技术。

本书在编写上力求理论性、系统性、实用性和先进性的统一,内容新颖,深入浅出,覆盖面广。本书可作为从事无损检测、材料工程和生物医学工程等专业的科研人员了解与掌握锥束 CT 技术的参考资料,也可用做相关专业研究生或高年级本科生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

锥束 CT 技术及其应用/张定华,黄魁东,程云勇著. —西安:西北工业大学出版社,2010.12
(国防特色学术专著. 航空宇航科学与技术)

“十一五”国家级重点图书

ISBN 978-7-5612-2956-9

I. ①锥… II. ①张… ②黄… ③程… III. ①计算机 X 线扫描体层摄影 IV. ①R814.42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 230533 号

锥束 CT 技术及其应用

张定华 黄魁东 程云勇 著
责任编辑 孙倩

*

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072) 发行部电话:029-88493844 传真:029-88491147

<http://www.nwpu.com> E-mail: fxb@nwpu.com

陕西向阳印务有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:18.75 字数:456 千字

2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978-7-5612-2956-9 定价:38.00 元

前 言

无论在医学界还是工业界,如何在不损坏被测对象(人体或工业产品)的前提下,清晰而完整地显示其内部结构,为病情诊断、手术规划、工业制造、缺陷检测以及更广泛的地质勘探、文物考古等领域提供支持,一直是科学家们致力研究的重要课题之一。

20世纪70年代,计算机断层成像技术(Computed Tomography, CT)的临床应用实现了对被测对象的内部进行完整且无损的检测,开创了无损检测技术的新纪元。CT是通过对物体进行不同角度的射线投影测量而重建出物体横截面信息的成像技术,涉及放射物理学、数学、计算机学、图形图像学和机械学等多个学科领域。其最引人注目的应用是用于医学临床诊断领域,被人们称为医学CT(Medical CT, MCT),用于对人体的病灶做断层扫描,然后以图像方式分析和确定病状,成为临床医学诊断不可或缺、最为有效的手段。因此,CT技术也被公认为是20世纪后期最伟大的科技成果之一。

工业计算机断层成像技术(Industrial Computed Tomography, ICT)是20世纪80年代发展起来的先进无损检测技术,工业CT的基本原理与医学CT相同,因此也具有医学CT所有的基本特点。由于工业CT的检测特点是不受试件材料种类、形状结构等因素影响,成像直观、分辨率高,尤其在检查复杂构件方面显示了特有的优势,所以目前已被广泛应用于航空、航天、国防等重要领域。

锥束CT(Cone Beam Computed Tomography, CBCT)是利用锥形束射线源和面阵探测器采集被测物体不同角度的一系列投影图像,并根据相应的重建算法重建出连续的序列切片图像的成像技术,是一种新型的三维CT。与传统的二维CT相比,锥束CT具有扫描速度快、射线利用率高、切片内和切片间的空间分辨率相同、精度高等特点,是当今国际CT研究领域最活跃的前沿课题之一。

工业CT与医学CT的检测对象差别很大,以至从外表上几乎看不出多少相似的地方。医学CT的检测对象基本上是人体或器官,材料密度和外形尺寸的变化范围相对比较小。但是工业CT的检测对象就要广泛得多,从微/纳米级的集成电路到超过1m的大型工件,从密度低于水的木材、塑料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。另外,工业CT涉及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。这就使得不同用途的工业CT系统所用的射线源、探测器和系统结构很不相同,甚至工业CT系统之间的外

形也大不相同。从这个意义上说,理解工业 CT 比理解医学 CT 也许更加困难。

工业锥束 CT 技术的研究与应用主要包括以下四个方面的问题:

(1)原始投影图像的获取,包括扫描参数的选取、扫描方式的确定、扫描速度的优化等。

(2)CT 伪影的校正,如平板探测器相关校正、散射校正和射束硬化校正等,伪影校正的好坏直接决定 CT 系统能否应用以及应用的效果。

(3)三维图像重建,即如何从投影图像重建出 CT 序列图像。

(4)CT 图像的应用,主要包括分析和提取被检对象的几何信息和材料信息,以供各类不同的应用进行再加工和利用。

目前,解决以上问题的一些技术已经较为成熟,但还有一些关键技术环节尚未被很好地解决,而 CT 技术的发展又可能引入一些新问题或者把原有问题放大。鉴于锥束 CT 技术的复杂性以及应用对象的多样性,本书主要针对工业 CT 应用的能量段及典型对象(如空心涡轮叶片),着眼于获取锥束 CT 序列切片图像和基于 CT 序列切片图像的工程应用两大方面,采用理论分析、算法研究、计算机仿真和实验相结合的方法,介绍在一些关键技术上取得的重要突破,期望能为从事或者将要从事锥束 CT 工作的读者提供一些有价值的参考。

本书的内容编排、著作分工、汇总与定稿由张定华负责,本书是锥束 CT 研究课题组自 2000 年以来研究成果的一次小结。这里要特别感谢多年来在实验室 CT 研究方向取得学位和正在攻读学位的学生,主要有毛海鹏、张丰收、刘晶、王凯、梁亮、王庆胜、敖波、张顺利、刘远、刘晓鹏、张东平、金炎芳、陈志强、李明君、胡栋材、王苦愚、张涛、龚正国等。正是因为与他们的有益讨论和不断积累,才推动了实验室 CT 研究水平的不断提升。

全书共由 9 章组成,每章独立研究一个关键技术问题,同时各章又有很强的连贯性。其中,第 1,4 章由张定华、黄魁东著,第 2,3,5 章由黄魁东著,第 6,9 章由张定华、程云勇著,第 7,8 章由程云勇著。

由于本书涉及的研究范围很广,以及笔者的见识和水平有限,书中不妥及不足之处在所难免,敬请读者不吝赐教,批评指正。

著 者

2010 年 8 月于西安

目 录

| | |
|---------------------------------|-----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 CT 技术简史 | 1 |
| 1.2 工业 CT 发展现状 | 4 |
| 1.3 工业 CT 应用领域 | 6 |
| 参考文献..... | 9 |
| 第 2 章 锥束 CT 扫描系统 | 11 |
| 2.1 引言..... | 11 |
| 2.2 X 射线成像原理..... | 11 |
| 2.3 锥束 CT 系统构成 | 18 |
| 2.4 锥束 CT 安装参数标定..... | 26 |
| 2.5 锥束 CT 投影图像采集方法 | 34 |
| 2.6 锥束 CT 投影图像校正方法 | 41 |
| 参考文献 | 53 |
| 第 3 章 锥束 CT 仿真系统 | 55 |
| 3.1 引言..... | 55 |
| 3.2 锥束 CT 仿真模型 | 57 |
| 3.3 锥束 CT 仿真算法 | 64 |
| 3.4 STL 样本的投影计算 | 68 |
| 3.5 Voxel 样本的投影计算 | 75 |
| 3.6 锥束 CT 仿真实例 | 80 |
| 参考文献 | 89 |
| 第 4 章 锥束 CT 图像快速重建 | 95 |
| 4.1 引言..... | 95 |
| 4.2 FDK 重建算法 | 97 |
| 4.3 FDK 算法的改进 | 104 |
| 4.4 FDK 算法的并行化 | 111 |
| 4.5 锥束 CT 图像的自适应重建 | 128 |

| | |
|-------------------------------|------------|
| 参考文献 | 132 |
| 第 5 章 锥束 CT 图像伪影校正 | 136 |
| 5.1 引言 | 136 |
| 5.2 基于侦测模型的伪影综合校正方法 | 137 |
| 5.3 锥束 CT 散射校正 | 142 |
| 5.4 锥束 CT 射束硬化校正 | 155 |
| 参考文献 | 169 |
| 第 6 章 CT 图像的轮廓提取及表面重构 | 175 |
| 6.1 引言 | 175 |
| 6.2 CT 图像去噪 | 175 |
| 6.3 CT 图像边缘检测 | 180 |
| 6.4 边缘检测后处理 | 198 |
| 6.5 三维表面模型重建 | 210 |
| 参考文献 | 218 |
| 第 7 章 模型配准方法 | 224 |
| 7.1 引言 | 224 |
| 7.2 模型配准的数学模型 | 225 |
| 7.3 配准变换的求解方法 | 226 |
| 7.4 配准控制点集选取方法 | 228 |
| 7.5 模型配准过程加速算法 | 233 |
| 7.6 模型配准结果评估方法 | 239 |
| 7.7 模型配准实例 | 241 |
| 参考文献 | 242 |
| 第 8 章 几何尺寸测量分析 | 244 |
| 8.1 引言 | 244 |
| 8.2 基于图像的尺寸测量 | 244 |
| 8.3 工件外形偏差分析 | 248 |
| 8.4 薄壁件壁厚分析 | 251 |
| 参考文献 | 257 |
| 第 9 章 基于 CT 图像的材质与缺陷分析 | 258 |
| 9.1 引言 | 258 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| 9.2 基于 CT 图像的材质信息获取 | 258 |
| 9.3 基于 CT 图像的二维缺陷检测 | 263 |
| 9.4 基于 CT 图像序列的三维缺陷检测 | 277 |
| 参考文献..... | 290 |

第 1 章 绪 论

1.1 CT 技术简史

计算机断层成像技术(Computed Tomography, CT)是通过对物体进行不同角度的射线投影测量而获取物体横截面信息的成像技术,涉及放射物理学、数学、计算机学、图形图像学和机械学等多个学科领域。其最引人注目的应用是用于医学临床诊断领域,被人们称为医学 CT(Medical CT, MCT),用于对人体的病灶作断层扫描,然后以图像方式分析和确定病状,成为临床医学诊断不可或缺、最为有效的手段。因此,CT 技术也被公认为是 20 世纪后期最伟大的科技成果之一。

CT 产生于 20 世纪 70 年代,但其历史可以追溯到 1895 年伦琴发现 X 射线。伦琴也因此成为诺贝尔物理学奖的第一位获得者。断层成像的概念最早由挪威物理学家 Abel 在 1826 年针对轴对称物体的横截面信息恢复而提出,奥地利数学家 J. Radon 在 1917 年发展了 Abel 的思想,使成像对象扩展到任意形状的二维截面^[1]。Radon 提出了投影图像重建的基本数学理论,指出任何物体均可用无限多个投影来表示;反之,如果知道无限多个投影,便可重建该物体对象^[2]。1956 年,美国斯坦福大学的天文学教授 R. N. Bracewell^[3]将这项技术引入到射电天文学领域,针对无线电天文学中确定产生微波辐射的太阳区域问题,重建出太阳的活动图。而最初把断层成像术应用于医学领域的当属 Oldendorf^[4],他是在 1961 年研制了用 γ 射线进行透射型成像的初级装置。直到 1963 年才由美国物理学家 Cormack 首先提出用断层的多方向投影重建断层图像的代数计算方法^[5]。第一台临床用的计算机断层成像扫描装置于 1967—1972 年间由英国 EMI 公司的工程师 Hounsfield 研制成功^[6],Hounsfield 和 Cormack 两人也由于他们对 CT 技术的卓越贡献而共同获得 1979 年诺贝尔物理和医学奖。1980 年 G. T. Herman 教授在其专著中系统地深入阐述了 CT 的理论基础^[7]。

断层成像技术可以采用不同的能量波和粒子束,如 X 射线、 γ 射线、电子、中子、质子、红外线、射频波和超声波等。如果应用的能量波是由检测对象内部发射的,则称为发射型 CT(Emission CT),如正电子发射断层成像术(Positron Emission Tomography, PET)和单光子发射计算机断层成像术(Single Photon Emission Computed Tomography, SPECT)。如果检测数据是根据沿射线方向透过检测对象的能量波获得的,则称为透射型 CT(Transmission CT)。如果检测数据是根据能量波从检测对象内部反射(或散射)而获得的,则称为反射型 CT(Reflection CT),如康普顿背散射断层成像。透射型 X 射线(γ 射线)CT 是目前历史最为悠久和研究应用最为广泛的断层成像技术,本书将要研究的 CT 成像技术即采用这种模式。除非特别声明,本书后续部分出现的 CT 均指透射型 CT。

CT 扫描系统自 20 世纪 70 年代问世后到 90 年代初是一个发展阶段,称为传统 CT 系统。在这 20 年内,CT 系统不断朝着提高成像速度与质量的方向发展,但主要集中于二维断层成

像,根据其发展的时序、成像几何和扫描方式的不同,可分为五代 CT 系统^[8]。第一代 CT 是单源单探测元系统,采用平移-旋转的类平行束扫描方式。第一代 CT 系统结构简单、成本低,但射线利用率低、检测时间长,目前已极少应用。第二代 CT 系统使用单源小角度扇形射束和多探测元,由于射线扇束角小,不能完全包容被检断层,故仍采用平移-旋转扫描方式。第三代 CT 采用了具有大扇角、宽扇束的单射线源和多探测元系统,使得扫描方式简化为单一的旋转运动,因此其便于控制、检测效率高,理论上只须旋转一周即可检测一个断层。第四代 CT 系统采用的也是一种宽扇束单源,只有旋转运动的扫描方式,但它有由相当多探测元形成的固定圆环,仅由射线源快速旋转进行扫描,其特点是扫描速度快、成本高。第五代 CT 系统又称电子束 CT,由一个电子束 X 射线源和一组固定的环形探测元阵列等部件构成。扫描时,射线源、探测器和检测对象都保持静止不动,系统通过电磁线圈对 X 射束进行聚焦,再利用变化的偏转线圈来改变 X 射束的照射方向,轰击不同方位的钨靶,以进行不同角度的投影测量。五代 CT 扫描机示意图如图 1.1 所示^[9]。

20 世纪 80 年代末滑环等新技术的出现和发展,极大地提高了传统 CT 系统的扫描速度,使传统 CT 系统至今仍然发挥着重要的作用。90 年代初单排螺旋 CT 的问世,开创了 CT 系统的新时代^[10],1998 年多排螺旋 CT 系统的成功研制和上市,被视为 CT 发展史上又一个新的里程碑。当前螺旋 CT 发展很快^[11],128 排、256 排和 320 排已得到应用,512 排也将很快投入市场。不同于传统 CT 系统,螺旋 CT 系统中射线源和多排探测器相对检测对象作螺旋扫描运动,并在多排探测器上收集 X 射线光子,在扫描速度上近似认为可获得与探测器排数相当的增益。

随着实时有源面阵探测器等硬件技术的发展,锥束 CT(Cone Beam CT, CBCT)系统的研制近年来正在飞速发展,它利用快速采集的二维投影数据直接重建检测对象的三维断层图像。螺旋 CT 和锥束 CT 都可视为体积 CT(Volumetric CT, VCT)扫描系统,与传统的二维 CT 相比,VCT 具有扫描速度快、图像分辨率较高、辐射利用率高等优点,成为 CT 的重要研究热点和发展方向。

锥束 CT 较螺旋 CT 有更多的优点,主要表现在以下几个方面^[12]。首先,锥束 CT 具有更高的扫描速度和辐射利用率,它在螺旋 CT 进行一次圆周扫描的时间周期内,可完成数百个断层图像的投影扫描,并有效地减少 X 射线管的负载输出,降低扫描成本。其次,锥束 CT 可显著地减少部分容积效应,能获得比螺旋 CT 更高精度的空间分辨率,且其表现为 X, Y, Z 三个方向上各向同性。再次,锥束 CT 具有局部放大扫描能力,可获得与胶片投影成像的空间分辨率相媲美的真三维断层图像数据,而对比度比其高 50~100 倍。为了能对径向较长的物体进行直接扫描和快速精确的三维图像重建,近年来有很多研究人员展开了锥束螺旋 CT 技术的研究^[13-14],并且已有商品化系统投入使用。

由于 20 世纪 70 年代末到 90 年代初微型计算机和图像处理系统的高速发展,医学 CT 很快形成一个产业,不但给诊断医学带来革命性的影响,还成功地应用于无损检测(Non-Destructive Testing, NDT)、逆向工程(Reverse Engineering, RE)和材料组织分析等工业领域。工业 CT(Industrial Computed Tomography, ICT)是计算机断层成像技术的工业应用,它与医学 CT 的成像原理相同,但又具有自己的特点。最大的区别在于由于一般工业检测件的密度高、结构复杂且形状迥异,加之成像精度要求高,工业 CT 常采用穿透能力强的高能和焦点尺寸较小的辐射源。工业 CT 在非接触、不破坏的情况下获得物体的内部信息,与射线照相、超声等常规的无损检测手段和无损评价方法相比,工业 CT 具有检测速度快、空间及密度分辨率高等优点,不受检测物体的材料、形状和表面状况的影响。工业 CT 以二维或三维断层

图像的形式,清晰、准确、直观地展示被检测物体内部的结构、组成、材质及缺损状况,且在不少应用场合,它的独特贡献是其他无损检测手段所不能比拟的。为此,工业 CT 被国际无损检测界称为最佳的无损检测方法^[15]。

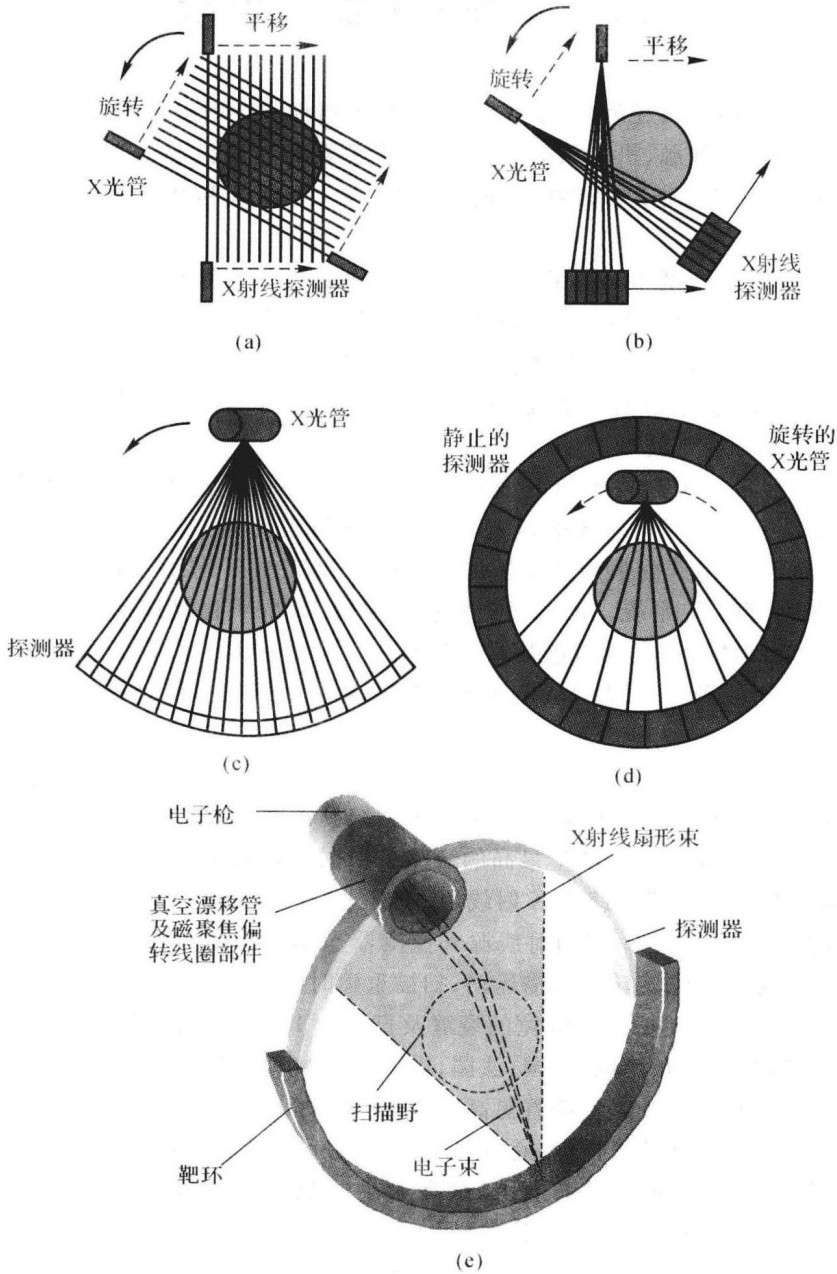


图 1.1 五代 CT 扫描机示意图

(a) 第一代 CT 扫描机； (b) 第二代 CT 扫描机； (c) 第三代 CT 扫描机；
(d) 第四代 CT 扫描机； (e) 第五代 CT 扫描机

目前,国际上主要工业发达国家已把工业 CT 技术广泛地应用于航天、航空、兵器、冶金、

机械、电子、建筑、地质和石油化工等工业领域,不仅用来进行工业设备和产品的无损检测和评估,而且正在逐步迈入工业生产过程控制领域。

1.2 工业 CT 发展现状

工业 CT 系统在国外历经近 30 年的发展,其技术指标和应用水平越来越高,已日趋成熟。工业 CT 系统主要由射线源、机械扫描机构、辐射探测器和计算机等子系统组成,根据所采用辐射探测器结构的不同可分为基于线阵探测器的二维 CT 系统和基于面阵探测器的三维 CT 系统。

早期的工业 CT 系统基本上都采用基于线阵探测器的二维断层成像系统结构,即其成像链为射线源+前准直器+CT 转台+后准直器+线阵探测器。这类扫描系统采用的线阵探测器是由一系列单个探测元组成的,每个探测元由闪烁体、光电二极管和数据采集单元构成成像单元体。由于采用了前、后准直器系统,这类扫描系统可很好地消除射线散射对成像质量的影响,重建出的 CT 图像非常清晰。

美国是世界上工业 CT 技术研究及设备研制最早也最先进的国家,ARACOR 公司从 1979 年开始致力于工业 CT 系统的研制,1983 年研制成功第一台工业 CT 设备。1988 年 ARACOR 公司研制出射线能量为 2MeV 的 ICT1500 型高能 X 射线工业 CT 系统,1995 年成功研制了 ICT2500 型 CT 系统。ICT2500 型系统采用 15MeV 直线加速器产生高能 X 射线,可对直径 2.5m 的固体火箭发动机进行 CT 重建^[16]。其后,ARACOR 公司将 ICT2500 型 CT 升级为 60MeV 的射线源,对直径 4m 的宇宙飞船火箭发动机模拟试件进行断层扫描,但并未商品化。

BIR 公司也是工业 CT 业界的一个技术领先者,所生产的 ACTIS 系列工业 CT 覆盖了从低能到高能 X 射线的能量范围,从桌面检测系统到定制的大工业应用检测系统^[17]。其中 ACTIS2000/6000 型工业 CT 是能量最高的产品。根据不同的检测需求,该型 CT 系统可分别安装 2MeV 和 6MeV 的直线加速器 X 射线源,能够对最大直径为 200cm,高为 250cm,质量为 1 000 kg 的构件进行 CT 检测;它的射线源和探测器运动机构由六轴同步伺服单元进行协调控制,可完成平移旋转或纯旋转等扫描运动;扫描重建时间从 60~600s 不等,空间分辨率可达 0.5mm,可检测出 1mm 长,50 μ m 宽的裂缝及直径为 100 μ m 的孔洞。

当前除美国以外,中国、德国、英国、法国、俄罗斯、加拿大和日本等国家都有二维工业 CT 的商品化产品,并正在生气勃勃地朝着更高的成像性能方向发展。概而言之,目前先进的二维工业 CT 系统已达到的主要技术指标:最高空间分辨率为 5~25 μ m,最高密度分辨率为 0.1%~0.5%,最大成像尺寸为 4 096 \times 4 096 像素,最高 X 射线能量为 60MeV,可检测最大直径为 4m 的物体。当然这些技术指标是相互制约的,同一台工业 CT 系统不可能同时达到上述指标。

随着面阵探测器制造工艺及相关技术的成熟,近年来基于面阵探测器的三维 CT 系统由于自身诸多优良特性得到了迅猛的发展和广泛的应用。这种扫描系统采用锥束射线,投影图像获取系统一般采用转换屏+面阵探测器结构,其中转换屏负责将入射的 X 射线转换成可见光,由镜头耦合到面阵 CCD 探测器,一次扫描可获得物体某一区域的二维投影图像,通过锥束三维图像重建算法对投影数据进行重构,可直接生成被检测物体的真三维断层图像。

美国 ARACOR 公司、GE 公司和 California 大学等研究机构在 20 世纪 90 年代初就开始积极研究锥束 CT 技术,并在医学和工业领域取得多项重要的研究成果。ARACOR 公司已研制出 Konoscope 160/200 和 Konoscope 130/40 两种型号的锥束 CT 扫描系统,分别采用 160keV 和 130keV 的 X 射线源管电压,可以检测最大 200mm 和 40mm 直径的物体,空间分辨率达到 0.40mm 和 0.07mm。TeraRecon 公司研制的锥束 CT 系统采用 $7\mu\text{m}$ 焦点尺寸^[18],电压为 45~130keV 的 X 射线源,以及 $127\mu\text{m}$ 像素间距的平板探测器,可对直径为 200mm、高为 160mm 的物体进行检测,该系统典型扫描时间是 25s,采用带有 16/32 个 DSP 的专用加速板卡进行并行三维图像重建,可输出最大达 $1\,024\times 1\,024\times 1\,024$ 的断层图像,最高空间分辨率可达 $10\mu\text{m}$ 。California 大学 Lawrence Livermore 国家实验室多年来一直从事基于转换屏的高能 X 射线工业 CT 的研究工作,研制出了原理样机,并在此基础上研究了多种不同 X 射线转换屏的成像特性。此外,美国 BIR 公司、HYTEC 公司都有各自的商用锥束 CT 系统(ACTIS+® 和 FlashCT)问世。GE 公司的 Nanotom 纳米焦点工业 CT 系统是世界上第一款纳米焦点工业 CT 系统,采用 160 keV 纳米焦点射线管、像素大小为 $50\mu\text{m}$ 的 $2\,200\times 2\,200$ 平板探测器和高精度转台,最高分辨率优于 500 nm,可用于传感器、半导体元器件、微型机械电子装置、各类材料(如合成材料、陶瓷复合材料和岩芯样本等)的计算机层析成像。

我国的工业 CT 技术研究和设备研制水平相对滞后于国外,起步于 20 世纪 90 年代初期。重庆大学 ICT 中心^[15]在 1993 年研制出我国第一台 γ 射线实用型二维工业 CT 机(XN-1300),极大地推动了我国工业 CT 技术的研究发展。清华大学^[19]近年来一直在从事检测陶瓷零件的高分辨率 X 射线工业 CT 的研究工作,已成功研制出基于线阵和面阵探测器的多套工业 CT 实验系统(BCT1~4)。中北大学自九五期间就开展了基于面阵 CCD 相机的高能 X 射线工业 DR/CT 技术的研究。大连理工大学^[21]在 2004 年研制了一套锥束三维工业 CT 扫描系统(ICT-3400),并通过了省科技成果及新产品鉴定。此外,北京航空航天大学^[22-24]、西北工业大学^[25-28]和中国工程物理研究院^[29-30]等多家科研单位目前都在积极地研制三维工业 CT 扫描系统。

无论是国外还是国内,在搭建的锥束 CT 硬件系统之上,还必须有相配套的软件系统,其中原始投影图像的获取和各种伪影的校正是必备的基本功能,而尤以伪影校正为重,伪影校正的效果直接决定锥束 CT 无损检测的可行性和可靠性,而且由于实际锥束 CT 硬件系统的非理想性,造成了伪影存在的必然性。

影响 CT 重建图像质量的因素主要有伪影和噪声两部分。重建图像中任何 CT 数据与物质真实吸收系数间的差异(线性映射差异)都称为伪影(Artifact)^[31]。某些情况下伪影是可量化的,某些情况下伪影难以量化。纯粹由于 X 射线的统计波动而产生的随机噪声不被认定为伪影。CT 扫描获得的原始数据,通常经过预处理、图像重建、后处理等过程生成图像,任何一个环节出现问题都会在结果图像中产生伪影。CT 切片伪影来源主要有以下几个方面^[32]:几何构件性能;探测器响应性能;射线源性能;采样密度;物质与射线间的作用关系;重建算法;理想滤波器;系统稳定性与噪声。

重建高质量的锥束 CT 切片图像的前提是如何获得高质量的投影图像。目前,在将锥束 CT 技术应用于较高密度工业零件的检测中发现,切片图像质量受射束硬化和散射影响严重。自 20 世纪 70 年代起就有许多文献报道了工业 CT 射束硬化校正方法,主要有单能法、双能法和实验校正法等,具体实现有预过滤法、多项式修正法、迭代修正法等。上述每一种校正方

法都有不同程度的局限性,效果不是很理想。散射效应不可避免,且与零件的材料和结构有关,一直是多数 CT 系统校正的重点,目前的方法在降低散射影响方面取得一定的效果,但迄今为止,这个问题还没有得到很好的解决(国外相对成熟的技术无法从公开领域得到)。

目前,美国、日本等发达国家工业 CT 已经进入应用阶段,在微小结构内视分析、三维几何模型重构、三维材料模型重构、试验过程三维监控等领域发挥了作用。从总体上来说,我国的二维工业 CT 系统已实现了商业化,且部分技术指标达到国际先进水平,而三维工业 CT 目前的商品化程度不高,与国外商用系统相比还有一定的技术差距。但我国自主开发的工业 CT 产品与国外同类产品相比,具有性价比更高等特点。当前我国大力倡导自主创新,相信国内的三维工业 CT 系统会在技术性能上取得重要突破,并在市场竞争中逐步显示出其优势。

1.3 工业 CT 应用领域

工业 CT 是计算机断层成像技术的工业应用,与常规射线检测技术相比,工业 CT 主要有下述优点。

①工业 CT 能给出检测工件的二维或三维图像,感兴趣的目标不受周围细节特征的遮挡,图像容易识别,从图像上可以直接获得目标特征的空间位置、形状及尺寸信息,而常规射线检测技术是将三维物体投影到二维平面上,造成图像信息叠加,评定图像需要有一定的经验,难以对目标进行准确定位和定量测量。

②工业 CT 具有突出的密度分辨能力,高质量的 CT 图像密度分辨率甚至可达到 0.1%,比常规无损检测技术高一个数量级。

③X 射线源焦点小、射束细、能量密度大,工业 CT 的空间分辨力高,能够精确地测定出被检物体内部结构(缺陷)的大小、位置和形状。

④工业 CT 图像是数字化的结果,从中可直接得出像素灰度、尺寸甚至密度等物理信息,数字化的图像便于存储、传输、分析和处理。

CT 技术的特点决定了其优越的应用价值,但也有其不足之处,主要表现在设备成本高、检测效率低、使用范围受到限制;工业 CT 装置专用性较强,按照检测对象和技术要求的不同,系统结构和配置可能相差很大;工业 CT 装置对细节特征的分辨能力与工件本身几何特性有关,对不同工件其分辨能力有差别。

工业 CT 包含以下工业应用方向。

①尺寸测量:可用于测量复杂零件(特别是内部结构复杂的零件)的形位尺寸。

②逆向工程:用于零件反求,即根据 CT 图像数据构造 CAD 模型,再根据 CAD 模型制造相应的零件,同时提供面向快速原型制造的数据接口。

③缺陷检测:定量检测零件内部缺陷的大小、位向,并可检测微裂纹的动态演变过程。

④检验装配:检查装配部件组成及其装配关系,这是根据工业 CT 对材料密度敏感的特性,通过适当的图像处理技术,能够区分出不同的零件。

⑤成分检测:如零件制造或复合材料制备过程中材料的均匀性,涂层的厚度及其均匀性等。

⑥结构优化:无损检测零件在不同载荷、不同环境下的变形及破坏情况,从而进行材料结

构辅助优化设计。

⑦失效和故障分析:检查零件失效和故障原因,工业 CT 检测结果可引导后续装配体拆分或进行破坏性实验。

图 1.2 给出了工业 CT 技术的部分应用实例^[33-35]。

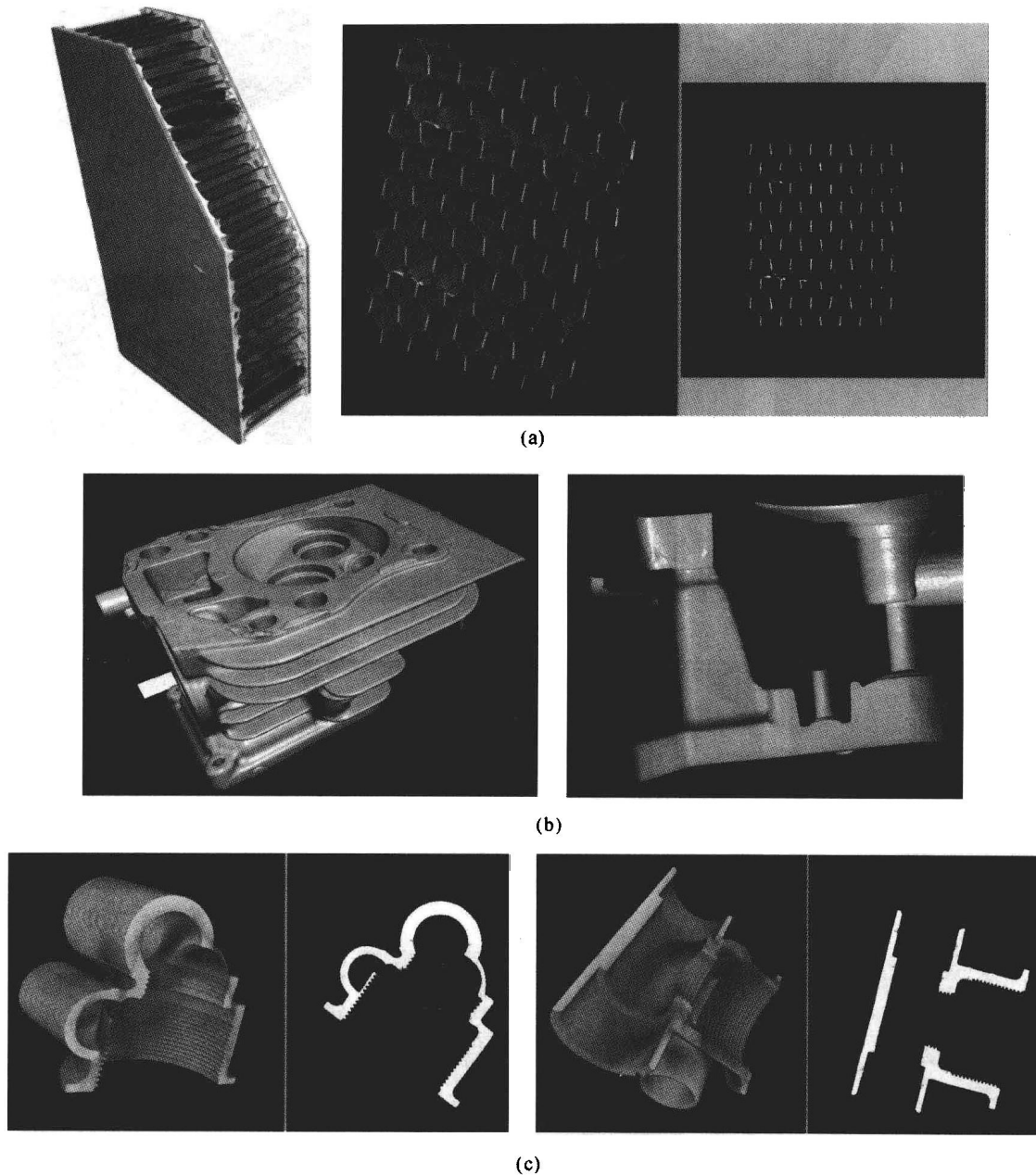
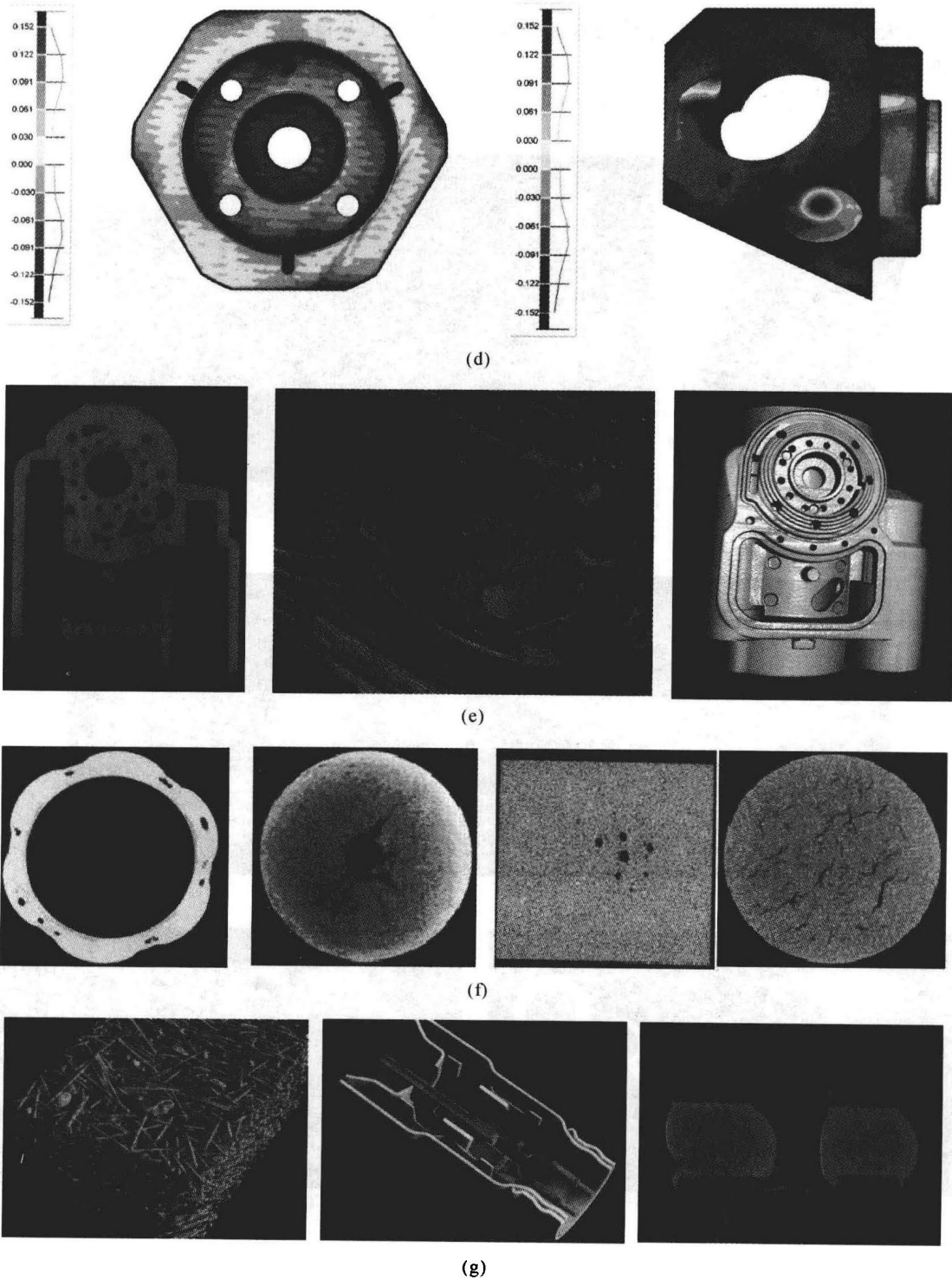


图 1.2 工业 CT 技术部分应用实例

(a)航空蜂窝件检测; (b)摩托车铸件检测; (c)连接件尺寸测量;



(续)图 1.2 工业 CT 技术部分应用实例

(d)三角件偏差分析；(e)塑料件逆向工程；(f)内部缺陷检测与分析；(g)微/纳米 CT 细小结构检测