



■ 韩跃平 著

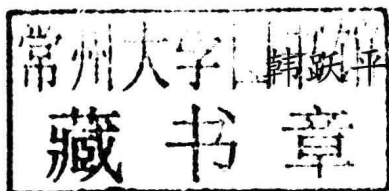
# X射线视觉自动检测 技术及应用



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



# X 射线视觉自动检测 技术及应用



著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

X 射线视觉自动检测技术及应用/韩跃平著. —北京:国防工业出版社, 2012.11

ISBN 978-7-118-08386-6

I. ①X… II. ①韩… III. ①X 射线探测—应用—工业产品—结构缺陷—自动检测—缺陷检测 IV. ①TB303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 230557 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 7¼ 字数 181 千字

2012 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 46.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

# 前 言

在航空航天、船舰、国防、汽车、高铁等领域，存在各种生产周期短、批量大、内部零部件众多且装配结构复杂的关键产品，这些产品在装配过程中存在的结构性隐患，不仅会导致自身失效，而且有可能引发整个系统在生产、运输、储存及使用过程中的安全事故。区别于传统的材料内部缺陷检测与痼疾识别，产品装配结构正确性检测既有对内部零部件的漏装与错装检测，也包括对诸多零部件相互之间的空间位置关系是否正确的判别。对大批量产品装配结构的在线自动检测，需要快速采集、识别产品内部的三维结构信息，目前仍然是行业内未能很好解决的难题。

常规的磁粉检测、涡流检测、渗透检验等无损检测方法，均由于各自的技术特点而局限于对不同材料的表面进行缺陷检测。超声检测技术可以实现对构件内部深层缺陷的探伤，但超声波的界面反射特性使其难以获取产品内部各种零部件构成的错综复杂的空间结构信息。X 射线检测技术因其强穿透性与良好的信息保持特性，近年来在产品的痼疾检测、内部结构分析等方面均得了快速发展并起着不可替代的作用。其中，主流的 X 射线检测技术主要有数字成像（Digital Radiography, DR）检测技术与计算机层析成像 CT 检测技术。

DR 检测技术因其实时性而广泛用于焊缝检测、产品内部缺陷检测等。然而，传统的 DR 检测技术属于单目成像检测，获取的数据是二维信息，对垂直于射线光路的缺陷具有速度快、检测准确的优势，对平行于射线光路的缺陷则无能为力，且产品内部零部件之间存在的射线遮挡不可避免地存在视觉盲区，不能直接

用于产品内部结构的三维识别。

CT 检测技术基于 Randon 变换与 Fourier 中心切片定理，形成了一整套成熟、严谨的完备理论体系，成为当前对产品内部结构状态检测与分析的最有效方法。其基本原理是通过一系列平移、旋转，获取产品平行（或近似平行）于射线光路的某一断面在所有视角下的投影数据，然后按照一定的算法重建出该断面结构图层的过程，通过对所有断面的投影重建，可以实现三维结构体的整体分析重建，并且能精确识别产品任意方位切面的状态与缺陷。但 CT 检测技术需要完成大量的数据采集与重建工作，尽管科研人员很好地采用了锥束投影、不完全数据重建、GPU 加速以及近年来试图利用压缩感知（Compressive Sampling）理论对一些可压缩的或稀疏矩阵图像的处理等方法，其冗长的时间耗费仍然无法用于大批量产品的快速自动识别，目前科技工作者对 CT 技术的研究基本局限于医学诊疗、生物细胞、安检、新产品研制或仿研等领域。

20 世纪 90 年代以后，国内多家单位相继展开了具有对象针对性的数字 X 射线实时成像系统与相关技术的研究。2005 年，北京航空航天大学研究了基于平板探测器的航空发动机叶片 X 射线实时成像自动检测技术，在区域划分与差值图像的基础上提取缺陷的几何特征参数，解决了对航空发动机叶片的 X 射线自动检测。兰州三磊电子有限公司于 2008 年研制了国内首条数字化 X 射线轮胎检测自动线，利用高分辨率的图像检测轮胎内部脱层、气泡、夹杂等缺陷。中南大学采用数学形态学和迭代阈值分割相结合的方法提取缺陷区域，设计了基于遗传策略的特征选择和基于神经网络识别算法，开发了碳素制品的 X 射线缺陷自动检测系统。上述卓有成效的工作很好地解决了各自领域的构件内部缺陷检测，推动了射线图像处理技术的发展，但大多是针对具体的应用领域与特定的检测对象而展开的具体软件算法研究及侧重于提高空间分辨率与透度灵敏度的硬件系统集成，没有涉及对产品内部零部件有无与相互之间空间几何位置关系等结构信息的采集识别。

在安检领域，清华大学于 2003 年开发了高能 X 射线集装箱检查系统和大型物件工业 CT 成像系统，研制了双能螺旋 CT 行李物品扫描系统，利用双能技术实现对危险品自动识别和检测，研发了国际上首台液体安全检查系统。中国人民公安大学与公安部第一研究所于 2009 年研究了基于背散射和双能透射信息融合的密度检测技术，利用校正后的背散射信号和低能透射信号提取出与被检物体密度相关的特征量加以区分物质。安检技术主要是利用 X 射线衰减系数与物质原子序数及密度的相关性实现对违禁品的检测，并不关心物体相互之间的空间位置关系与结构信息。而且，双能或多能检测技术需要多个射线源与探测器，既增加了设备负担与检测成本，同时也难以实现快速准确的自动识别控制。

国外 Yxlon、GE 等公司已成功研制出各种移动式、便携式、微焦点 X 射线检测系统，轮胎/轮毂检测系统，行李与包裹检测系统以及康普顿—背散射系统等系列产品并投放市场。可能出于技术保护原因，迄今未见国外有成熟的针对三维空间结构信息识别的 X 射线自动检测系统报道。近 10 年的资料查新与跟踪，对三维结构体的自动识别大多限于地理场景配准、生物医学的肿瘤与细胞匹配、目标跟踪识别、机器人技术等领域。对于工业结构体的 X 射线自动检测技术，甚至基于可见光的结构体外部几何结构状态的自动识别技术，国内外均鲜有报道。

中北大学韩焱老师带领的科研团队从“九五”起开始了产品结构内视技术的研究，1999 年提出了机械产品内部构件状态的多方位视觉检测方法，通过特征值拟合曲线建立了故障诊断模型，2003 年实现了对产品内部钢珠有无的检测。2004 年研究了工业 DR/CT 成像检测技术并完成了系统集成，将产品置于 X 射线源与成像器件之间的高精度四轴检测工作台上连续自旋转，通过人眼反复观察工件在全周向方位下的射线视频图像进而决策合格与否，同时在该系统上实现了任意角度下三维切片的重建。2007 年研制了针对某轴状类产品内部装配结构正确性的 X 射线自动检测系统，采集产品全周向方位图像然后提取分层次混合投影特征的

主分量熵，进而采用神经网络实现了在有限方位下对产品的快速自动识别。

本书凝聚了作者长期以来从事 X 射线系统集成与自动检测技术的研究与实践。全书紧扣“X 射线视觉自动检测技术及应用”这一主题，第 1 章对 X 射线成像的物理基础作了概念与基本原理性介绍；第 2 章介绍 X 射线检测设备与常见的各种 X 射线成像系统，侧重介绍 X 射线机和各种探测器；第 3 章重点阐述 X 射线视觉自动识别的可行性与可实现性的理论问题；第 4 章设计 X 射线自动识别成像系统；第 5 章简介自动识别中必要的 X 射线图像预处理技术；第 6 章在对产品分类以及内部识别目标分类的基础上，解决产品内部结构状态的自动快速识别，重点介绍降维特征的提取；第 7 章介绍作者的实际工程案例；第 8 章探讨新兴的 X 射线光栅成像技术并作前景展望。

本书由国家自然科学基金面上项目“基于 X 射线立体视觉的自动检测系统关键技术研究”（NO. 611711178）、山西省自然科学基金（NO. 2012011010—3）、2012 年度山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划资助课题、2011 年度山西省高等学校优秀创新团队支持计划资助课题、博士后科学基金（NO. 20110490366）联合资助出版。感谢中北大学韩焱老师对本书的指导；感谢王黎明教授、潘晋孝教授、桂志国教授、王明泉教授、李文艳女士、郭敏姝女士等对本书部分专题给以的帮助；感谢李瑞红副教授对本书的编排与大量图表的辛苦绘制工作。

希望本书对从事 X 射线无损检测、模式识别、计算机视觉的科技工作者具有一定的参考价值。鉴于本人水平有限，且有些工作尚需进一步深入研究，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

著 者

2012 年 7 月

## 主要符号对照表

$\lambda$	X 射线波长
NDT	无损检测 (Nondestructive Testing)
DR	数字辐射成像 (Digital Radiography)
CT	计算机层析成像 (Computed Tomography)
CR	间接数字成像 (Computed Radiography)
IP	影像板 (Imaging Plate)
Image Intensifier	像增强器
TFT	平板 (Thin Film Transistor)
LDA	线性二极管阵列 (Linear Detector Array)
PSL	光致发光 (Photostimulated Luminescence)
Computer Vision	计算机视觉
DQE	量子探测器效率 (Detective Quantum Efficiency)
SPR	空间分辨率 (Spatial Resolution)
Sensitivity	灵敏度
Contrast	对比度
Unsharpness	不清晰度
DSR	密度分辨率 (Density Resolution)
MTF	调制传递函数 (Modulation Transfer Function)
SNR	信噪比 (Signal to Noise Ratio)
FBP	滤波反投影 (Filtered Back Projection)
ART	代数迭代算法 (Algebraic Reconstruction)



	Technique)
DART	差分代数迭代算法
Lp/mm	线对/毫米 (Line pair/mm)
COF	临界空间频率 (Cut-Off Frequency)
BW	射束宽度 (Beam Width)
$f_0$	临界焦距 (Critical Focal Length)
Image Processing	图像处理
Image Preprocessing	图像预处理
PCA	主成分分析(Principal Component Analysis)
CS	压缩感知 (Compressed Sensing)
Grating Imaging	光栅成像
PSI	保罗谢勒研究所 (Paul Scherrer Institut)
MRI	核磁共振成像 (Nuclear Magnetic Resonance Imaging)
ESRF	欧洲同步辐射装置 (European Synchrotron Radiation Facility)
BSRF	北京同步辐射装置 (Beijing Synchrotron Radiation Facility)

# 目 录

第 1 章 X 射线检测基础	1
1.1 X 射线	1
1.1.1 X 射线的发现与产生	1
1.1.2 X 射线的特点与性质	5
1.2 X 射线与物质的相互作用	7
1.2.1 散射作用	8
1.2.2 光电效应	9
1.2.3 电子对效应	10
1.3 X 射线的衰减规律	14
1.3.1 单色射线的衰减规律与半厚度	14
1.3.2 宽束、连续谱射线的衰减规律	16
1.3.3 多色射线的衰减规律	16
1.4 X 射线的折射与小角散射	17
1.4.1 X 射线的折射	17
1.4.2 X 射线的小角散射	18
1.5 X 射线的检测原理与特点	19
1.5.1 X 射线检测原理	19
1.5.2 X 射线检测特点	20
1.6 常见检测缺陷及其影像特征	21
1.6.1 铸件中的常见缺陷	21
1.6.2 焊件中的常见缺陷	23
1.6.3 表面缺陷	24

1.6.4	缺陷深度的确定 .....	25
1.6.5	产品的装配结构缺陷 .....	26
	参考文献 .....	27
<b>第 2 章</b>	<b>X 射线检测设备与系统 .....</b>	<b>29</b>
2.1	X 射线机 .....	29
2.1.1	X 射线机的结构与分类 .....	29
2.1.2	X 射线机的基本组成 .....	31
2.1.3	X 射线机的工作过程 .....	38
2.1.4	X 射线机的技术性能 .....	39
2.1.5	X 射线机的常见故障与维护 .....	44
2.2	X 射线探测器 .....	47
2.2.1	胶片 .....	48
2.2.2	荧光屏 .....	50
2.2.3	像增强器 .....	50
2.2.4	线性二极管阵列 .....	56
2.2.5	影像板 .....	58
2.2.6	平板探测器 .....	60
2.2.7	CMOS 线性阵列 .....	64
2.2.8	X 射线管道爬行器 .....	64
2.3	图像采集卡 .....	66
2.4	防护装置 .....	68
2.5	常用 X 射线检测系统 .....	69
2.5.1	荧光透视成像系统 .....	70
2.5.2	胶片成像系统 .....	70
2.5.3	CR 成像系统 .....	71
2.5.4	DR 成像系统 .....	73
2.5.5	CT 成像系统 .....	76
	参考文献 .....	83

<b>第 3 章 X 射线自动识别理论</b> .....	84
3.1 X 射线视觉基础 .....	84
3.1.1 计算机视觉综述 .....	84
3.1.2 X 射线视觉检测技术现状 .....	86
3.1.3 工厂实际检测手段 .....	88
3.2 三维结构体全方位自动识别理论 .....	88
3.2.1 完备的全方位检测原理 .....	88
3.2.2 自动检测可行性的理论分析 .....	90
3.2.3 空间采样准则的提出 .....	95
3.3 有限方位下对产品的快速识别 .....	96
3.3.1 样本图像的随机序列表示 .....	97
3.3.2 样本图像随机序列的矩阵表示 .....	98
3.3.3 利用相关系数矩阵对产品的检测理论 .....	99
参考文献 .....	100
<b>第 4 章 X 射线自动识别的成像系统</b> .....	101
4.1 成像系统的总体设计 .....	101
4.1.1 自动识别系统总体结构流程 .....	101
4.1.2 X 射线 DR 检测系统的不足 .....	102
4.1.3 自动检测成像系统总体设计 .....	103
4.2 系统优化 .....	104
4.2.1 透度灵敏度 .....	104
4.2.2 空间分辨率 .....	110
4.2.3 密度分辨率 .....	112
4.2.4 射线能量利用率 .....	115
4.3 成像系统关键模块的选取与设计 .....	120
4.3.1 X 射线机 .....	120
4.3.2 成像器件 .....	120
4.3.3 多工位高精度检测工作台 .....	121
4.3.4 准直器 .....	123

4.3.5	射线防护 .....	123
4.3.6	打标装置 .....	124
4.4	自动检测系统的整体工作节拍 .....	124
	参考文献 .....	125
<b>第5章</b>	<b>X射线图像的预处理 .....</b>	<b>126</b>
5.1	图像预处理综述 .....	126
5.2	图像降噪 .....	127
5.3	目标图像分割 .....	130
5.3.1	水平方向目标范围的确定 .....	132
5.3.2	垂直基准的确定 .....	134
	参考文献 .....	136
<b>第6章</b>	<b>基于特征的产品快速自动识别 .....</b>	<b>137</b>
6.1	多模式分类策略 .....	137
6.1.1	多类模式的并行识别 .....	138
6.1.2	多类模式的串行识别 .....	139
6.2	产品与目标的结构类型及检测要求 .....	140
6.2.1	产品分类 .....	142
6.2.2	产品内部识别目标的分类 .....	145
6.3	图像模式识别算法的评价标准 .....	149
6.4	典型的多模式分类降维识别方法 .....	151
6.4.1	基于主成分分析法 .....	152
6.4.2	基于方向选择的投影法 .....	157
6.5	特征提取 .....	164
6.5.1	图像特征的选择 .....	166
6.5.2	分层面多目标特征提取 .....	171
6.5.3	全方位识别特征 .....	173
6.5.4	识别特征基 .....	174
6.6	基于神经网络的快速识别 .....	175

6.6.1	神经网络模型的建立 .....	175
6.6.2	BP 网络模型的优化 .....	177
	参考文献 .....	178
<b>第 7 章</b>	<b>工程案例</b> .....	<b>179</b>
7.1	硬件组成 .....	179
7.2	软件系统 .....	181
7.2.1	检测主体流程 .....	181
7.2.2	总体结构 .....	182
7.2.3	软件功能模块及主要程序流程 .....	184
7.3	现场应用试验与结果分析 .....	188
7.3.1	检测试验 .....	188
7.3.2	多阈值确定与识别准确率评估技术 .....	194
7.4	技术与系统推广 .....	196
	参考文献 .....	197
<b>第 8 章</b>	<b>X 射线光栅成像技术及其应用展望</b> .....	<b>198</b>
8.1	综述 .....	198
8.2	X 射线一维光栅成像 .....	200
8.2.1	实验装置与方法 .....	200
8.2.2	存在的问题与改进措施 .....	203
8.2.3	对精密相位步进的松弛 .....	204
8.2.4	高分辨率大视场光栅成像 .....	206
8.3	多维光栅成像 .....	208
8.3.1	二维光栅成像 .....	208
8.3.2	光栅四维成像 .....	210
8.4	光栅成像技术在微细结构体识别领域的展望 .....	212
	参考文献 .....	213

# 第 1 章 X 射线检测基础

“工欲善其事，必先利其器”。本章主要介绍 X 射线成像检测的物理基础，包括 X 射线的发现与产生、特点与性质，X 射线与物质的相互作用，X 射线的衰减规律，X 射线的检测原理与特点等；此外，针对工业应用，介绍了 X 射线检测中常见的缺陷及其影像特征。

## 1.1 X 射线

### 1.1.1 X 射线的发现与产生

#### 1. X 射线的发现

19 世纪末，阴极射线是物理学的前沿问题，许多知名物理学家都在研究阴极射线，到 1895 年，由阴极射线管产生的 X 射线在实验室里已经存在了 30 多年。在 X 射线发现前，不断有人抱怨，放在阴极射线管附近的照相底片模糊或感光，如 1879 年的克鲁克斯，1890 年的古德斯比德等人，但发现 X 射线的却是伦琴。

伦琴于 1845 年出生于德国的一个商人家庭，1869 年在苏黎世大学获得博士学位。1895 年 11 月 8 日傍晚，伦琴在研究阴极射线管中气体放电实验时，为了避免杂光对实验的影响，用黑纸板将管子包起来，却发现距离阴极管一段距离外的一块涂有铂氰酸钡 ( $\text{Ba}[\text{Pt}(\text{CN})_4]$ ) 结晶物质的屏幕发出了荧光，伦琴马上意识到这可能是一种前所未有的新射线，经检查发现射线来自阴极射线管管壁。

令人惊奇的是，当用木头等不透明物质挡住这种射线时，荧光屏仍然发光，而且这种射线能使黑纸包住的照相底片感光，不

被电磁场偏转。经过一个多月的研究，伦琴未能搞清楚这种射线的本质，因此赋予它一个神秘的名字——X射线。1895年12月28日，伦琴向德国物理学医学会递交了第一篇关于X射线的论文《论新的射线》，并公布了他夫人的X射线手骨照片。

1901年12月10日，由于伦琴的贡献，他被授予诺贝尔物理学奖，成为世界科学家中第一个获得诺贝尔奖金的物理学家。

伦琴的发现引起了极大的轰动，以至于在全世界范围内掀起了X射线研究热，1896年关于X射线的研究论文高达1000多篇。对X射线的公布，促使法国物理学家贝克勒尔也投入到这一研究领域之中，为了弄清X射线产生的机制，他想，如果把荧光物质放在强光下照射时，是否在发荧光的同时，也能放出X射线呢？进一步的研究使他发现了铀元素的天然放射性，引导人类走进了原子世界的大门，并获得了1903年诺贝尔物理学奖。

此后的100多年，从物理到化学再到生理医学领域，X射线被广泛应用，引发了一系列诺贝尔奖传奇。

## 2. X射线的本质

X射线究竟是一种电磁波，还是一种粒子流，曾经争论多年，直到1912年德国物理学家劳厄和他的助手发现X射线通过晶体后产生衍射现象，才证明它是一种波长很短的电磁波。X射线在本质上与无线电波、红外线、可见光、紫外线、 $\gamma$ 射线一样，都是电磁辐射，具有相同的传播速度，但频率与波长则不同，如图1-1所示。X射线的波长较紫外线短，但比 $\gamma$ 射线长，因此它有许多与可见光不同的性质<sup>[1]</sup>。

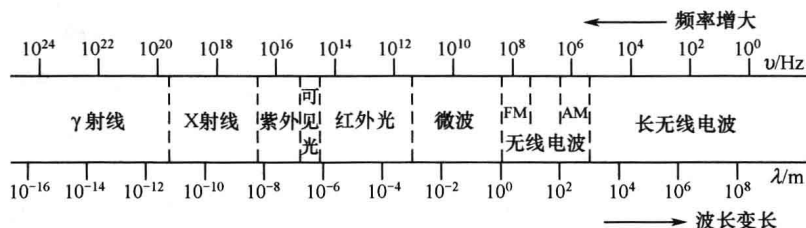


图 1-1 电磁波谱图



包括 X 射线，所有的电磁波在空间传播时，满足

$$c = \nu \cdot \lambda \quad (1-1)$$

式中： $\lambda$  为电磁波的波长 (m)； $\nu$  为电磁波的辐射频率 (Hz)； $c$  为波速 (约  $2.998 \times 10^8$  m/s)。

实验研究发现，当射线与物质作用时还会发生光电效应和电子对效应。射线波动理论无法解释这些实验事实。而利用 1905 年爱因斯坦提出的光子理论却能很好地解释这两种效应，说明 X 射线具有粒子性，与可见光一样，X 射线与  $\gamma$  射线也可以被看成是光子流的微粒。射线光子也具有一定的能量，由普朗克 (Plank) 量子理论，每个光量子的电磁辐射产生的能量可表示为

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1-2)$$

式中： $E$  为每个光量子的光能 (J)； $h$  为普朗克常数 ( $6.626 \times 10^{-34}$  J·s)。

X 射线和可见光一样，具有波粒二象性：单个 X 射线光子的运动显示出粒子性，大量 X 射线光子的运动显示出波动性。X 射线光子的能量越小，波长越长，X 射线的波动性也就越明显；反之，X 射线光子的能量越大，波长越短，X 射线的粒子性越显著。波粒二象性是一切微观粒子的共同属性。

由图 1-1 可见，X 射线的波长范围为  $10^{-12}$  m  $\sim$   $10^{-8}$  m， $\gamma$  射线的波长范围为  $10^{-14}$  m  $\sim$   $10^{-10}$  m，在电磁波谱中两者有重叠部分。X 射线、 $\gamma$  射线本质相同，区别仅在于产生方式上的不同。X 射线是通过高速电子轰击金属靶产生的，因此 X 射线的能量和强度都可以控制和调节。 $\gamma$  射线则完全不一样，它是放射性物质的原子核在天然衰变过程中放射出来的，其能量和强度都无法控制和调节。因而，在工业射线成像检测中广泛使用 X 射线。

### 3. X 射线的产生

无论是在低能的 X 射线管还是高能的电子直线加速器中，当电子从阴极飞出时，在电场力等的作用下其速度不断增大，当高速运动的电子到达阳极表面时，由于阳极物质的阻止作用，小质