

无损检测人员取证培训教材

# 数字射线检测技术

第3版

郑世才 王晓勇 编著

**D**IGITAL IMAGING  
IN RADIOLOGY

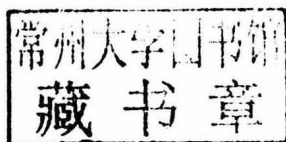
精心设计的实验和复习参考题，助力轻松取证  
大量实际检测技术讲解，使工作得心应手

无损检测人员取证培训教材

# 数字射线检测技术

第3版

郑世才 王晓勇 编著



机械工业出版社

本书内容包括概述、辐射探测器与其他器件、数字射线检测基本理论、数字射线检测基本技术、工业常用数字射线检测系统、等价性问题、实验及附录。经过本次修订，本书在内容上构成了一个基本完整的数字射线检测技术知识系统，形成了比较清楚的对Ⅱ级人员与Ⅲ级人员要求的区分界定。

本书是为射线成像检测技术Ⅱ、Ⅲ级人员编写的关于数字射线检测技术的附加培训教材，适合已经取得Ⅱ级及以上射线照相检测技术资格的人员使用。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

数字射线检测技术/郑世才, 王晓勇编著. —3 版. —北京: 机械工业出版社, 2019. 2

无损检测人员取证培训教材

ISBN 978-7-111-61980-2

I. ①数… II. ①郑… ②王… III. ①数字技术-应用-射线检验-技术培训-教材 IV. ①TG115. 28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 025799 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: 潘蕊 封面设计: 鞠杨

责任印制: 张博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2019 年 3 月第 3 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 12 印张 · 296 千字

0001—2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-61980-2

定价: 69.00 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](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

# 前 言

本教材是为射线成像检测技术Ⅱ、Ⅲ级人员编写的关于数字射线检测技术的附加培训教材，因此关于射线成像检测技术的物理基础、射线源、工艺与缺陷等方面知识均不涉及。使用本教材的人员应是已经取得Ⅱ级或Ⅲ级射线照相检测技术资格的人员。

本教材除了未涉及简要的CT技术介绍外，可认为很好地覆盖了IAEA（国际原子能机构）制定的关于工业数字射线检测技术的RT-D培训大纲（见IAEA的2015年TCS-60文件）要求。本教材已经被中国机械工程学会无损检测分会和航天工业作为无损检测人员技术资格培训的数字射线检测技术培训教材。

关于数字射线检测技术，本培训教材对Ⅱ级人员设定的基本要求是：按照执行的数字射线检测技术标准，正确完成一般工件的检测工作；对Ⅲ级人员设定的基本要求是：能正确处理一般工件的数字射线检测技术问题。

根据培训使用情况，这次修订对第2版进行了较多方面的修改、补充，主要包括下列六个方面：①删除了原第1章物理基础内容，重新编写为概括介绍数字射线检测技术的概述；考虑到目前制定的数字射线检测技术标准正处于不断修改、更新的状态，删除了原第7章介绍标准规定内容。②依据作者及其他科研人员的研究成果，新编写了一些重要内容，包括第3.4节的细节识别基本理论，第4.3.3节透照技术的源到工件表面距离处理（几乎国内外目前全部制定的标准都未做出这方面正确或全面的规定）；补充更换了许多试验图片等。③调整结构修改原编写内容，以便清楚地界定对Ⅱ级人员的要求，主要包括第2章的探测器介绍、第4章的基本技术介绍和第5章的DR系统与CR系统介绍等内容。④结合实际检测技术，将实验项目扩展为10个，新增加了曝光曲线制作、图像软件使用、DDA数字射线检测系统使用、CR数字射线检测系统使用。⑤修改了附录的内容，主要删除了原附录C，新编写了数字图像增强处理技术简介、动态数字射线检测技术、射线检测技术系统的调制传递函数等。⑥针对Ⅱ级人员培训与考核，修改了各章后的复习题与参考答案。

修改后的培训教材由概述、辐射探测器与其他器件、数字射线检测技术基本理论、数字射线检测基本技术、工业常用数字射线检测系统、等价性问题、实验及附录组成。可以认为，修改后的教材内容构成了一个基本完整的数字射线检测技术知识系统，形成了比较清楚的Ⅱ级人员与Ⅲ级人员要求的区分界定。

由于标准在培训中作为单独科目进行，而且目前正处于标准短期更新与不断修改的过程，因此在培训时需要教师依据考核要求开展对适用的数字射线检测技术标准的相关教学。无论选择哪个标准，都希望能从技术系统构成角度深入理解标准的主要技术规定内涵，而不是简单地了解标准的技术规定条文。

本教材共编写了10个实验。实验内容对于Ⅱ级人员是需要掌握的知识或操作技能，应结合教学过程完成。其中实验1至实验6为演示性实验。即，前期采用摄像机记录实验过程，课堂上进行演示与相关说明，或对结果进行分析讨论；实验7可采用演示实验过程，提

供实验数据，要求学员自己完成数据处理的方式进行；实验 8 至实验 10 为操作实习性实验，每个学员必须亲自完成（可分成小组进行）。教师可依据教学情况增加新的演示性实验或操作实习性实验。

附录供深入理解某些问题时参考。每章后面的复习题是针对 II 级人员的要求编写的。

还需要说明的是，在编写本教材过程中，没有找到可供参考的同类教材。教材的系统构成和主要内容是依据作者掌握的数字射线检测技术和对数字射线检测的理解做出的设计。尽管已经经过了小范围的使用，做了修改，但是否符合要求，还需要经过实际检验。由于作者的学识、经验限制，内容中也可能存在错误，衷心期待广大读者指正。

编者

# 目 录

说明：无标记的章、节、段为Ⅱ级人员与Ⅲ级人员共同要求的内容；目录编号前加“\*”的章、节为对Ⅲ级人员要求的内容；目录标题后加“（\*）”表示该节中包括了对Ⅲ级人员要求的段落内容（正文中该段落前加“\*”）。目录编号前加“\*\*”的章、节为要求Ⅲ级人员简单了解的内容。

前 言	
第 1 章 概 述	1
1.1 数字射线检测技术的发展概况	1
1.2 数字射线检测技术与胶片射线检测技术的区别	2
1.3 数字射线检测技术基本理论	3
1.4 等价性问题	3
1.5 数字射线检测技术标准	4
复习题	5
第 2 章 辐射探测器与其他器件	6
2.1 辐射探测器概述	6
2.1.1 辐射探测器的类型(*)	6
*2.1.2 辐射探测器的一般特性	8
2.1.3 辐射探测器系统	9
2.2 辐射探测器系统的基本性能	10
2.3 分立辐射探测器 (DDA)	11
2.3.1 非晶硅辐射探测器(*)	11
2.3.2 非晶硒辐射探测器	12
2.3.3 CCD 或 CMOS 辐射探测器	13
2.3.4 分立辐射探测器的性能(*)	14
2.4 成像板系统 (IP 板系统)	15
2.4.1 IP 板(*)	16
*2.4.2 IP 板的主要特性	17
2.4.3 IP 板系统的基本性能(*)	18
*2.5 图像增强器系统	20
*2.5.1 图像增强器的基本结构	20
*2.5.2 图像增强器系统的探测过程	21
*2.5.3 图像增强器系统的主要性能	21
2.6 A/D 转换器	22
2.7 射线检测的像质计与线对卡	24
2.7.1 像质计概述	24
2.7.2 常规像质计	24
2.7.3 双丝型像质计(*)	26
*2.7.4 线对卡	29
复习题	30
第 3 章 数字射线检测基本理论	33
3.1 数字图像概念	33
3.1.1 数字图像的基本概念	33
3.1.2 数字图像的空间频率	34
**3.1.3 灰度	35
*3.1.4 数字图像文件格式	35
3.2 图像数字化基本理论	36
3.2.1 图像数字化过程	36
3.2.2 采样定理(*)	38
*3.2.3 量化位数	39
3.3 数字射线检测图像质量	40
3.3.1 检测图像对比度	40
3.3.2 检测图像空间分辨力(*)	41
3.3.3 检测图像信噪比(*)	43
3.4 检测图像与细节识别和分辨	45
3.4.1 检测图像与细节识别的关系(*)	45
3.4.2 检测图像与细节分辨的关系(*)	47
**3.5 细节可识别性理论关系式	50
复习题	52
第 4 章 数字射线检测基本技术	55
4.1 概 述	55
4.2 探测器系统选择	56
4.2.1 探测器系统概述	56
4.2.2 探测器系统基本空间分辨力选择	57

4.2.3 规格化信噪比选择 .....	58	* 5.4 图像增强器数字射线检测系统 .....	113
4.3 数字射线检测透照技术 .....	59	** 5.5 微焦点数字射线检测系统 .....	115
4.3.1 透照技术控制概述 .....	59	** 5.6 底片图像数字化扫描技术 .....	116
4.3.2 最佳放大倍数(*) .....	59	** 5.6.1 扫描仪概述 .....	116
4.3.3 源到工件表面的距离(*) .....	62	** 5.6.2 扫描仪的基本性能指标 .....	117
4.3.4 曝光曲线(*) .....	65	** 5.6.3 扫描技术 .....	119
4.4 图像数字化参数控制 .....	69	** 5.6.4 扫描仪选用 .....	120
4.5 检测图像显示与缺陷评定技术 .....	70	复习题 .....	121
4.5.1 图像显示与观察条件(*) .....	70	<b>第6章 等价性问题</b> .....	123
4.5.2 图像观察识别技术 .....	71	6.1 等价性问题概述 .....	123
4.5.3 缺陷识别与质量级别评定 .....	74	6.2 等价技术级别评定 .....	124
4.5.4 尺寸测量(*) .....	76	6.2.1 等价技术级别评定概述 .....	124
** 4.5.5 厚度测定 .....	80	* 6.2.2 胶片射线照相检测技术的检测 图像质量指标分析 .....	125
4.6 数字射线检测图像质量控制 .....	82	* 6.2.3 等价技术级别评定过程 .....	126
4.6.1 检测图像质量参数控制 .....	82	* 6.2.4 等价技术级别评定例题 .....	127
4.6.2 图像质量的补偿规则(*) .....	83	** 6.3 等价性问题的理论处理方法 .....	130
* 4.7 数字射线检测技术级别近似设计 .....	85	复习题 .....	132
* 4.7.1 技术级别设计概述 .....	85	<b>第7章 实验</b> .....	134
* 4.7.2 检测图像常规质计指标 近似设计 .....	86	实验1 DDA 基本空间分辨力测定 .....	134
* 4.7.3 检测图像不清晰度(空间分辨力) 指标设计 .....	87	实验2 DDA 规格化信噪比与曝光量平方根 关系曲线测定 .....	136
* 4.7.4 例题 .....	88	实验3 DDA 像素尺寸对缺陷检测的 影响 .....	137
4.8 数字射线检测技术稳定性控制 .....	90	实验4 IP 板图像读出扫描点尺寸对缺陷 检测的影响 .....	138
4.8.1 检测工艺文件(检测程序 文件) .....	90	实验5 曝光量对检测图像质量的影响 .....	139
4.8.2 检测系统性能的长期稳定性 试验控制 .....	91	实验6 最佳放大倍数试验 .....	140
4.8.3 检测工艺卡编制 .....	91	实验7 曝光曲线制作 .....	142
复习题 .....	98	实验8 图像软件使用 .....	143
<b>第5章 工业常用数字射线检测系统</b> .....	101	实验9 DDA 数字射线检测系统使用 .....	144
5.1 概述 .....	101	实验10 CR 数字射线检测系统使用 .....	145
5.2 DR 系统 .....	102	<b>附录</b> .....	146
5.2.1 DR 系统组成 .....	102	附录A 辐射探测器的基础性知识 .....	146
5.2.2 DR 系统技术控制(*) .....	103	附录B 采样定理说明 .....	166
5.2.3 探测器响应校正与坏像素 修正(*) .....	104	附录C 数字图像增强处理技术简介 .....	167
5.2.4 DR 系统应用特点 .....	106	附录D 动态数字射线检测技术 .....	171
5.3 CR 系统 .....	107	附录E 射线检测技术系统的调制传递 函数 .....	174
5.3.1 CR 系统检测基本过程 .....	107	附录F 复习参考答案 .....	182
5.3.2 CR 系统技术控制 .....	108	<b>参考文献</b> .....	185
5.3.3 CR 系统应用 .....	111		

# 第 1 章 概 述

说明：本章对Ⅱ级人员学习的主要要求是：

- 1) 掌握数字射线检测技术概念。
- 2) 了解数字射线检测技术的主要改变。
- 3) 了解数字射线检测技术标准制定的简要情况。

为后续各章内容的学习提供线索。

## 1.1 数字射线检测技术的发展概况

从 20 世纪 20 年代射线照相检测技术进入工业应用以来，射线检测技术的发展已有近百年的历史。在工业领域应用的射线检测技术，已经形成由射线照相检测技术（Radiography）、射线实时成像检测技术（Radioscopy）、射线层析成像检测技术（Tomography）构成的比较完整的射线无损检测技术系统。

1) 射线照相检测技术包括：

- ① 常规胶片射线照相检测技术（获得模拟检测图像）
- ② IP 板射线照相检测技术（CR 技术）（获得数字检测图像）。
- ③ 面阵探测器（DDA）射线照相检测技术（获得数字检测图像）。

2) 射线实时成像检测技术

- ① 图像增强器实时成像检测技术（获得数字检测图像）。
- ② 探测器（DDA）实时成像检测技术（获得数字检测图像）。

3) 射线层析成像检测技术包括：

- ① CT 层析成像检测技术（获得数字检测图像）。
- ② CST（康普顿散射）层析成像检测技术（获得数字检测图像）。

此外，还在探索研究新的射线检测技术，如相对比度射线检测技术（PCRT 技术）等。

从 20 世纪 90 年代起，普遍开始关注数字射线检测技术。简单说，数字射线检测技术（digital radiology）就是可获得数字化检测图像的射线成像检测技术。获得数字射线检测图像是数字射线检测技术的基本特征。从获得的检测图像角度，可将工业射线成像检测技术分为常规射线检测技术和数字射线检测技术。

常规射线检测技术是指采用胶片完成的射线照相检测技术。

数字射线检测技术目前可分成三个部分：直接数字化射线检测技术、间接数字化射线检测技术、后数字化射线检测技术。CT 技术、CST 技术是特殊的直接数字化射线检测技术，可称为层析数字射线检测技术。

直接数字化射线检测技术是指采用分立探测器阵列（数字探测器阵列）完成射线检测

的技术。分立探测器阵列 (discrete - detector arrays, DDA) 也称为数字探测器阵列 (digital - detector arrays)。直接数字化射线检测技术包括平板 (面阵) 探测器射线成像检测技术、线阵探测器射线成像检测技术等。这些技术在辐射探测器中完成图像数字化过程, 从探测器直接给出数字化的检测图像。直接数字化射线检测技术采用 DR (direct radiography) 表示, 现在 DR (digital radiography) 也常泛指数字射线检测技术。间接数字化射线检测技术的探测器 (如 CR 技术的 IP 板) 不完成图像数字化过程 (A/D 转换), 检测图像的数字化的过程需要采用单独的技术单元完成。现在工业应用的是 CR 技术和采用图像增强器完成的成像检测技术。后数字化射线检测技术是指采用图像数字化扫描装置, 将胶片射线照相检测技术的底片图像转换为数字检测图像的技术。

现在, 日常所说的数字射线检测技术, 通常仅指采用 IP 板成像的 CR 检测技术和采用 DDA 成像的 DR 检测技术。

数字图像可以方便地进行图像处理和传输交换。数字图像也为检测图像信息自动识别提供了基础。与常规射线照相检测技术比较, 数字射线检测技术的优点之一是动态范围宽, 这样可通过数字图像增强处理识别检测图像含有的更多信息。

对于数字射线检测技术, 可以建立射线检测技术工作站。在检测工作现场完成图像采集, 将图像传输到工作站中心, 在工作站中心完成检测后期工作。图 1-1 显示了三种数字射线检测技术与工作站的关系。

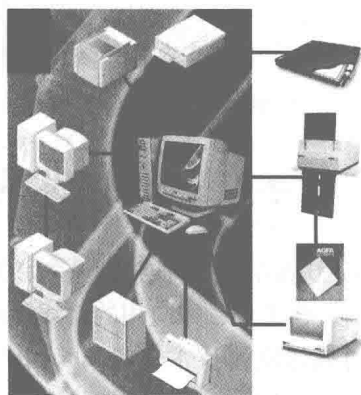


图 1-1 数字射线检测技术与工作站关系

## 1.2 数字射线检测技术与胶片射线检测技术的区别

图 1-2 是常规胶片射线照相检测技术系统与数字射线检测技术系统框图。从图中可见, 常规胶片射线照相检测技术与数字射线检测技术物理基础相同, 系统构成部分相同。其不同

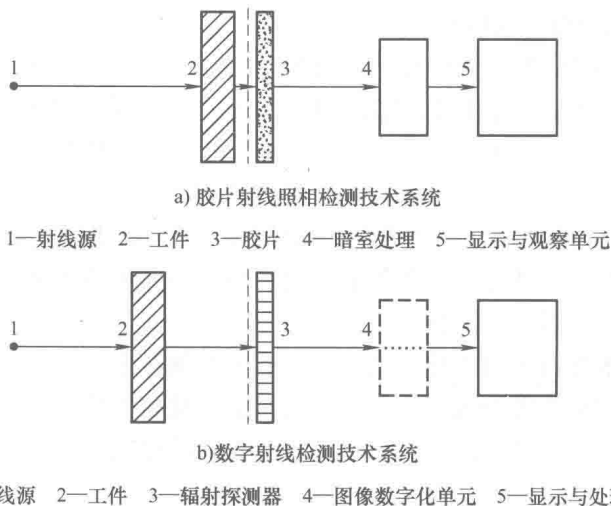


图 1-2 胶片射线照相检测技术和数字射线检测技术系统框图

在于：常规胶片射线照相检测技术采用胶片探测射线信号，将射线信号转换为胶片中的潜影，形成检测图像初始信号，经暗室处理转换为可见底片图像；数字射线检测技术采用（其他类型）辐射探测器探测和转换射线信号，形成检测图像初始信号，经图像数字化过程转换为可显示的数字检测图像。

数字射线检测技术与常规胶片射线照相检测技术的基本区别可概括为：

- 1) 采用辐射探测器代替胶片完成射线信号的探测和转换。
- 2) 采用图像数字化技术，代替暗室处理获得数字检测图像。

### 1.3 数字射线检测技术基本理论

数字射线检测技术与常规胶片射线照相检测技术，由于物理基础相同，两者的技术系统构成框架也相同，基本理论体系也应相同。但数字射线检测技术还有自身特有的基本理论，主要是表征图像质量的基本参数、图像质量与技术因素的关系、细节识别基本理论、检测技术控制理论和检测图像质量控制等方面。

关于表征图像质量的基本参数，目前广泛接受的是 ASTM E2736 标准概括的图像质量基本参数——对比度、空间分辨力和信噪比（ISO 主要数字射线检测标准采用），但某些研究人员希望提出其他的表征参数。现在的研究已经给出了图像质量参数与技术因素的基本关系；国内基于眼睛识别细节特性的 Rose 定律已经建立了系统的细节识别基本理论。

关于检测技术控制理论，国内已经将图像数字化过程控制理论引入数字射线检测技术，并作为技术控制方面的重要理论。

关于检测图像质量控制，在目前制定的主要数字射线检测技术标准中，对表征检测图像质量三个基本参数——对比度、空间分辨力和信噪比做出了规定，采用常规像质计测定检测图像对比度，采用双丝型像质计测定检测图像空间分辨力（不清晰度），同时要求设计的透照参数应保证达到检测图像信噪比。

实际上，这些基本理论的建立，多数都是基于常规胶片射线照相检测技术基本理论。

### 1.4 等价性问题

数字射线检测技术的应用必须面对的一个基本问题是“等价性问题”。即数字射线检测技术（系统）与胶片射线照相检测技术（系统）是否具有同等缺陷检测能力。或者说，何种数字射线检测技术（系统）可以替代何种胶片射线照相检测技术（系统）。

关于等价性问题，从数字射线检测技术刚进入工业应用时就已经提出，国际焊接学会在 20 世纪 80 年代中期至后期曾组织过试验研究。当时的基本结论是，尽管常规像质计灵敏度可以达到胶片射线照相检测技术的要求，但实际的缺陷检测灵敏度达不到胶片射线照相检测技术水平，特别是对于裂纹性缺陷，应用时必须从缺陷检测灵敏度考虑。国内也讨论过类似问题。

近些年，国内外主要是进行大量缺陷检测对比试验和像质计识别对比试验，讨论两种技术的缺陷检测能力问题。国内的研究以成像过程基本理论为基础，将数字射线检测技术和胶片射线照相检测技术作为成像系统，从是否构成具有同等成像质量的成像系统角度，从理论上讨论等价性问题。

国内已经给出了依据检测图像质量的三项指标同等性,判定检测技术级别等价性的简单处理方法。这解决了实际应用中的主要等价性问题——标准等价替代问题、检测技术系统等价替代问题。

## 1.5 数字射线检测技术标准

1999年制定了第一个CR成像检测技术标准(ASTM E2033),此后,国外相继制定了一系列数字射线检测技术标准,主要标准可分为四类:导则标准、探测器系统性能标准、检测技术标准和数字图像标准,此外还有其他标准。部分主要标准如下。

ASTM E2007 《CR技术导则 光激发射荧光方法》

ASTM E2033 《CR检测技术 光激发射荧光方法》

ASTM E2445 《CR系统长期稳定性评定》

ASTM E2446 《CR系统制造特性》

ASTM E2736 《数字探测器阵列射线检测技术导则》

ASTM E2597 《数字探测器阵列制造特性》

ASTM E2737 《数字探测器阵列性能和长期稳定性评价方法》

ASTM E2698 《使用数字探测器阵列的射线检测技术》

ASTM E2422 《铝铸件检验的数字标准图像》

ASTM E2660 《航空用熔模钢铸件的数字标准图像》

ASTM E2669 《钛铸件的数字标准图像》

ASTM E2869 《镁铸件的数字标准图像》

ASTM E2973 《铝镁压铸件的数字标准图像》

ISO 10893-7 《焊接钢管数字射线检测技术》

ISO 16371-1 《采用储存荧光成像板的工业计算机化射线照相技术第1部分:系统分类》

ISO 16371-2 《采用储存荧光成像板的工业计算机化射线照相技术第2部分:金属材料X射线和 $\gamma$ 射线检测的一般原则》

ISO 17636-2:2013 《焊接接头射线检验第2部分:数字探测器X射线和 $\gamma$ 射线检验技术》

EN 14096-1 《射线照相底片数字化系统评定第1部分:定义、图像质量参数定性测量、标准片和定性控制》

EN 14096-2 《射线照相底片数字化系统评定第2部分:最低要求》

此外,从一般理论角度也应将实时成像检测技术列入数字射线检测技术。

在有关数字射线检测技术标准中,导则标准、系统性能标准需要关注的主要是美国材料试验学会标准(ASTM标准),另外,值得关注的是国际标准化组织2013年发布的焊接接头数字射线检测技术标准ISO 17636-2:2013和欧洲关于底片数字化的标准EN 14096-1、EN 14096-2:2003。

应注意的是,这些标准都处于不断修改中,有的发生了很大改变,例如,ASTM E2007补充了大量内容;有的甚至否定了原版的规定,如ASTM E2446标准,不仅其名称从“CR系统分类”修改为“CR系统制造特性”,而且主要规定也做了全面修改。即使这样,对目前版本的标准,包括其主要技术规定,也不能认为都正确。实际上,在部分标准中可以清楚

看到存在明显的不恰当的规定。这反映了数字射线检测技术还处于不断发展与完善的过程中。

国内的数字射线检测技术标准，基本是等同采用或参考国外标准制定的，仅个别标准是自行编制的（关于数字射线成像术语的国家标准）。到目前共发布了 10 项国家标准和 2 项行业标准，某些标准同样包含着明显的不正确规定。

## 复 习 题

### 一、选择题（将唯一正确答案的序号填在括号内）

- 下面列出的射线检测技术系统组成中，错误的是（ ）
  - 射线照相检测技术
  - 射线实时成像检测技术
  - 射线层析成像检测技术
  - 微焦点射线检测技术
- 下面列出的数字射线检测技术与胶片射线照相检测技术的基本差别中，正确的是（ ）
  - 采用探测器代替胶片探测射线信号
  - 采用小焦点射线源
  - 采用放大透照方式
  - 采用数字图像处理技术
- 与胶片射线照相检测技术比较，下列数字射线检测技术带来的技术优点中，错误的是（ ）
  - 消除了污染环境的暗室处理技术
  - 可以方便地实现信息传输和交换
  - 可运用数字图像处理技术，为图像自动识别提供了新的基础
  - 可获得更高空间分辨力的数字检测图像
- 下面列出的数字射线检测技术目前制定的主要标准类型中，错误的是（ ）
  - 导则性标准
  - 设备器材标准
  - 系统性能标准
  - 检测技术标准

### 二、判断题（判断下列叙述是正确的或错误的，正确的划○，错误的划×）

- 数字射线检测技术是射线检测技术建立的基于新的物理基础的射线检测技术。（ ）
- 数字射线检测技术理论必须解决的问题主要是数字检测图像质量表征、细节可识别性理论、图像数字化过程控制及等价性处理理论。（ ）
- 可认为 ISO 17636-2:2013 标准是目前值得关注的对数字射线检测技术做出了比较具体规定的标准，尽管它存在值得考虑其正确性的个别规定。（ ）
- 一般可认为，数字射线检测技术与胶片射线照相检测技术具有同等的缺陷检验能力。（ ）

### 三、问答题

- 简述数字射线检测技术概念。
- 简述数字射线检测技术与胶片射线照相检测技术的差别。
- 数字射线检测技术与胶片射线照相检测技术比较，主要优点是什么？

## 第 2 章 辐射探测器与其他器件

说明：本章对 II 级人员应完成如下实验：

实验 1 DDA 基本空间分辨力测定；

实验 2 DDA 规格化（标准、归一）信噪比剂量平方根关系曲线测定。

实验的具体内容见第 7 章，按演示性实验进行。

关于辐射探测器的一些相关基础性知识可参阅附录 A 的相关内容。

### 2.1 辐射探测器概述

#### 2.1.1 辐射探测器的类型(\*)

辐射探测器完成射线的探测和转换，是获得射线检测图像的基本器件，也是影响获得检测图像质量的基本因素。下面介绍辐射探测器按探测原理的分类以及构成辐射探测器的某些公共部分的简要相关知识。

##### 1. 辐射探测器按探测原理的分类

按辐射探测原理，辐射探测器可分为三类：气体辐射探测器、闪烁辐射探测器、半导体辐射探测器。

(1) 气体辐射探测器 气体辐射探测器采用气体作为辐射探测介质，利用辐射使气体电离实现辐射探测。辐射与气体作用，一部分能量使气体电离，电离产生的离子对在电场作用下形成电离电流，通过测量电离电流完成对辐射的测定。图 2-1 给出了气体辐射探测器的探测原理。

(2) 闪烁辐射探测器 闪烁辐射探测器采用闪烁体作为辐射探测介质，利用闪烁现象（光致发光过程）实现对辐射的探测。闪烁现象是指闪烁体受辐射照射引起瞬时发射可见光现象。闪烁体是探测器的基本探测介质。入射辐射与闪烁体作用时，闪烁体吸收辐射的能量，并把吸收的部分能量以可见光的形式发射出来。将光信号转换为电信号（光电阴极受光照射发射光电子），测定电信号实现对辐射的探测。图 2-2 给出了闪烁辐射探测器的探测原理。

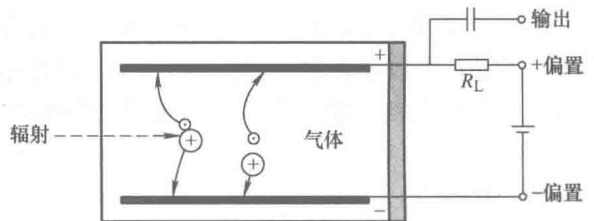


图 2-1 气体辐射探测器的探测原理

(3) 半导体辐射探测器 半导体辐射探测器利用半导体作为探测介质进行辐射探测。辐射入射到半导体时, 损失的能量产生大量电子-空穴对。在电场作用下, 电子和空穴分别向两极漂移, 在输出回路形成电信号。通过检测电信号完成对辐射的测定。半导体辐射探测器的探测原理如图 2-3 所示。

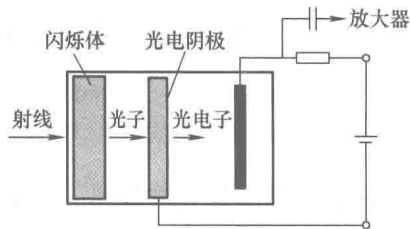


图 2-2 闪烁辐射探测器的探测原理

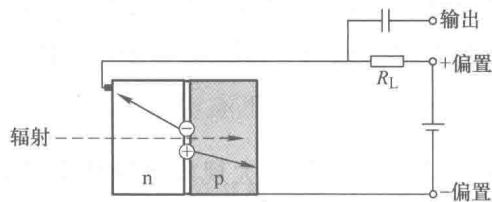


图 2-3 半导体辐射探测器的探测原理

半导体辐射探测器可看作是一个探测介质为半导体的固体电离室。

在工业数字射线检测技术中实际使用的辐射探测器, 一般具有复杂的结构 (并不是上述的简单原理型探测器结构), 常包括了射线信号的探测、转换、处理、读出等功能结构。不同结构的辐射探测器, 探测的具体过程也不同。

## \* 2. 闪烁体

闪烁体是部分辐射探测器的基本组成部分, 用于将辐射信号转换为可见光信号, 提供给探测器后续结构进行转换、探测。

辐射照射可引起瞬时发射可见光的物体一般称为发光材料。发光材料以粉状细小颗粒制作探测器部件时称为荧光物质, 发光材料以透明单晶体制作探测器部件时称为闪烁 (晶) 体。对于高能射线情况, 发光材料常简单统称为闪烁体。

简单地说, 闪烁体在辐射照射时的发光过程是: 闪烁体吸收辐射能量, 在闪烁体中产生高能电子; 高能电子的部分动能在闪烁体中产生激发态; 从激发态跃迁到基态释放能量, 形成可见光辐射。与激励能量 (射线吸收) 同时的光发射称为荧光, 在激励源去除后持续的光发射称为磷光。

对于辐射探测器, 常用的荧光物质是硫氧化钷 (铽作为激活剂)、硫化锌 (银作为激活剂)、硫化锌镉 (银作为激活剂)、钨酸钙等, 常用的闪烁晶体是锗酸铋、碘化铯 (铯作为激活剂)、氟化钙 (银作为激活剂)、碘化钠 (铯作为激活剂) 和钨酸镉等。表 2-1 列出了部分材料的部分主要特性。

表 2-1 常用荧光物质与闪烁晶体的主要特性

名称	化学式	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	发射峰值波长/nm	衰减常数 <sup>①</sup> /μs
硫化锌	ZnS (Ag)	4.1	450	0.060
硫化锌镉	ZnCdS (Ag)	4.5	550	0.085
硫氧化钷	Gd <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S (Tb)	7.3	550	480.0
锗酸铋 (BGO)	Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	7.13	480	0.300
碘化铯	CsI (Tl)	4.51	550	1.0

① 射线激发停止后光发射从最大强度降到其 37% 所需要的时间。

### \* 3. 非晶态半导体

按半导体的原子排列，半导体可分为晶态半导体和非晶态半导体。

非晶态半导体不同于晶态半导体，其基本特点是原子排列短程有序、长程无序。实验证明，非晶态半导体中每个原子周围的最邻近原子排列有规则，与同质晶体一样。但从次邻近原子开始可能是无规则排列，这不同于晶态半导体的原子排列长程有序。这使非晶态半导体（能带结构）出现了不同于晶态半导体的特点。

### \* 4. TFT

TFT，即薄膜晶体管大规模半导体集成电路。TFT 的主要单元是三端器件——场效应管，场效应管通过施加在绝缘栅极上的控制电压（可控制源极和漏极间的电流）实现对输出电流的控制。利用这种集成电路，可容易地（用场效应管作为开关）实现对大面积下、数量众多的矩阵单元进行控制。

在 TFT 中，也包含了实现其他功能的集成电路。

## \* 2.1.2 辐射探测器的一般特性

从辐射探测器的一般特性考虑，数字射线检测用的辐射探测器的主要性能可分为四个方面：转换特性、噪声特性、空间响应特性和时间响应特性。

### 1. 转换特性

转换特性描述的是探测器输入物理量与输出物理量间的关系，主要的描述参数是量子探测效率与动态范围。

量子探测效率（DQE）可简单地定义为单位时间（秒）输出信号光量子数与输入信号光量子数之比。它给出的是探测器将输入信号转换为输出信号的效率，值越高性能越好。在工业数字射线检测领域一般不采用该指标（在医疗领域重视该指标）。

动态范围定义为探测器可探测的最大信号与最小信号之比。由于数字射线检测的辐射探测器一般都工作在线性响应范围，所以动态范围实际常指探测器处于线性响应下可探测的最大信号与最小信号之比（有时也简单地指线性响应范围）。

### 2. 噪声特性

噪声特性描述的是探测器的信号响应波动情况。

探测器的主要噪声是量子噪声、电流噪声、热噪声和结构噪声等。这些噪声与信号大小相关，简单地说随信号增大而增加。为此，采用信噪比描述探测器成像过程产生的噪声特性。信噪比定义为获得的图像信号与图像信号噪声之比（要注意的是，这里的信噪比概念与以前常用的一般意义信噪比概念不同）。信噪比越高，图像质量会越好。

### 3. 空间响应特性

探测器空间响应特性描述的是探测器给出的输出信号空间分布与输入信号空间分布的关系。定量描述探测器的空间响应特性可采用探测器的点扩散函数或光学调制传递函数（或调制传递函数）。

在数字射线检测技术中，实用的描述探测器空间响应特性的参数是探测器的空间分辨力，它给出了探测器分辨几何细节的能力。

#### 4. 时间响应特性

时间响应特性表示的是探测器跟踪输入信号变化的能力。

一般说，探测器对输入信号的响应（跟踪）存在一定的滞后情况。即加载输入信号后，探测器的响应信号（输出信号）常会需要一定时间逐步达到对应输入信号的响应数值；输入信号停止后，探测器的响应信号会保持一段下降时间才能逐步减少到无响应信号状态（如荧光屏余辉）。

描述探测器时间响应特性的概念是惰性。表示惰性常用的参数是响应时间（响应时间常数）、衰减时间、余辉等。也引入了一些实际描述探测器时间响应特性的概念，如图像刷新时间等。

对于数字射线检测技术，由于光电发射几乎具有瞬时性，多数探测器的组成器件的光电转换过程都在微秒或纳秒数量级；而对于一般的检测技术，都不需要关注探测器的时间响应特性。但探测器涉及荧光物质时，由于某些荧光物质的衰减时间可能处于毫秒级别，对于快速检测技术，则需要关注探测器的时间响应特性。

### 2.1.3 辐射探测器系统

在数字射线检测技术中实际使用的辐射探测器具有复杂的结构，并不是上面介绍的简单的原理性结构。按照结构特点可以分为两大类：分立辐射探测器和连续结构辐射探测器。分立辐射探测器主要有非晶硅探测器、非晶硒探测器、CCD（或 CMOS）辐射探测器，连续结构辐射探测器主要有成像板（IP 板）、图像增强器等。

非晶硅探测器、非晶硒探测器、CCD（或 CMOS）辐射探测器，它们本身具有一个个分立辐射探测单元（像元），结构中还包括模/数转换（A/D 转换）部分，它们常统称为分立辐射探测器阵列（或称为数字探测器阵列），常用缩写符号 DDA 表示。这类探测器不仅完成对射线的探测与信号转换，同时也完成图像数字化，可以直接给出数字化的检测图像。探测器性能直接影响给出的检测图像质量。

成像板（IP 板）、图像增强器等探测器，本身是连续性结构（不分为一个个分立辐射探测单元），结构中也不包含模/数转换（A/D 转换）部分。对应于上面的分立辐射探测器，可以称这类探测器为连续结构辐射探测器。这类探测器仅完成对射线的探测与信号转换，直接获得的是常规模拟检测图像。为了给出数字化的检测图像，需要结合另外的图像数字化单元。探测器性能与相结合的图像数字化单元性能（包括采用的技术参数）共同决定了其整体的性能（例如可给出的像素尺寸），共同影响检测图像质量。从获得检测图像的质量考虑，对这类探测器必须从整体角度讨论。

为此，可以引用“探测器系统”概念。对于分立辐射探测器阵列，“探测器系统”就是它们本身；对于连续结构辐射探测器，“探测器系统”则是由探测器、检测图像数字化相关技术单元、该技术单元采用的技术参数等共同构成的整体。引入该概念，后续可以方便、统一讨论检测图像质量和检测技术。

在后面的叙述中，在不会引起混淆的情况下，常常简单地使用“探测器”这一术语，对于连续结构辐射探测器常是指“探测器系统”。

## 2.2 辐射探测器系统的基本性能

在日常检测中，辐射探测器系统性能主要指标是像素（像元）尺寸、空间分辨力、A/D 转换位数、动态范围、信噪比、适用能量、使用寿命等。从构成数字射线检测技术角度，辐射探测器系统的基本性能是基本空间分辨力（率）和规格化（标准化、归一化）信噪比。

### 1. 基本空间分辨力

空间分辨力表示的是探测器分辨几何细节的能力。对于某个探测器，在不同的使用技术条件下，可实现的空间分辨力可能不同。因此需要一个可表征辐射探测器（实际也是数字射线检测系统）空间分辨力性能的特殊空间分辨力指标。

基本空间分辨力定义为在规定的特定条件下（主要包括：透照的放大倍数为 1、特定的射线能量、几何不清晰度可忽略等），采用双丝型像质计测定的检测图像不清晰度值的 1/2，通常记为  $SR_b$ 。若记检测图像测定的不清晰度为  $U$ ，探测器的有效像素尺寸为  $P_e$ ，则

$$SR_b = \frac{1}{2}U \quad (2-1)$$

$$SR_b = P_e \quad (2-2)$$

基本空间分辨力决定了探测器在不采用放大技术时可分辨的细节的最小几何间距。

由于测定条件要求几何不清晰度可忽略，一般近似认为

$$U \approx U_D$$

式中  $U_D$ ——探测器固有不清度。

这样就有 
$$U_D = 2SR_b \quad (2-3)$$

即探测器基本空间分辨力实际是探测器固有不清度的 1/2。需要注意的是，这是探测器系统的性能。

采用双丝型像质计测定探测器基本空间分辨力的具体要求可参考有关标准规定。

### 2. 规格化信噪比

信噪比表征的是探测器检测过程对输入信号的响应特性。检测信号是探测器对输入信号的响应，噪声是探测器对输入信号响应的波动变化。记检测信号平均值为  $S$ ，检测信号的统计标准差为  $\sigma$ ，则信噪比 SNR 为

$$SNR = \frac{S}{\sigma} \quad (2-4)$$

探测器获得的检测图像信噪比取决于探测器的结构特性，也与采用的射线检测技术相关。对于同样结构特性的探测器，在采用同样射线检测技术时，获得的检测图像信噪比还与探测器单元尺寸（像素尺寸）相关。因此为比较不同探测器的信噪比，必须在同样的探测器单元尺寸（像素尺寸）下进行。为此引入规格化（标准化、归一化）信噪比概念。