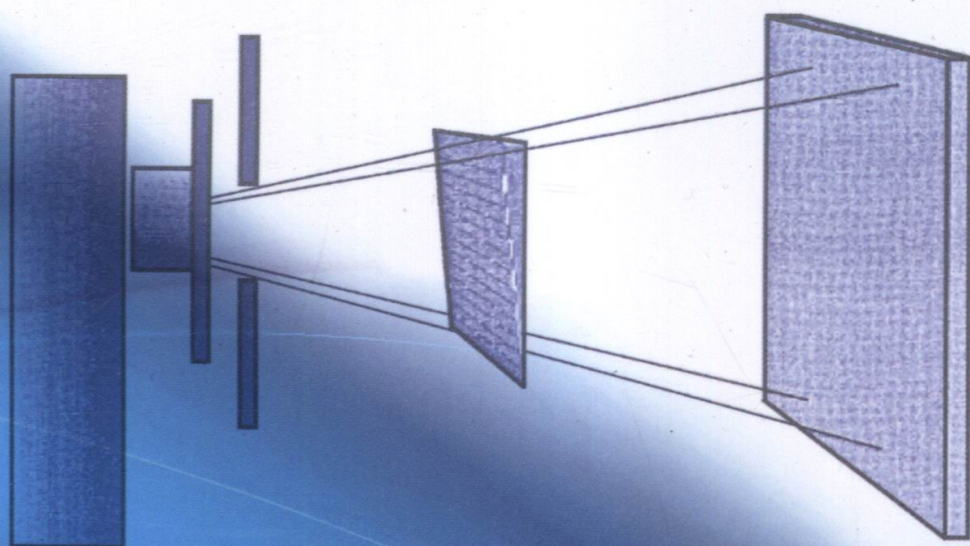


无损检测 II 级、III 级培训教材

数字射线 检测技术

郑世才 王晓勇 编著

第2版

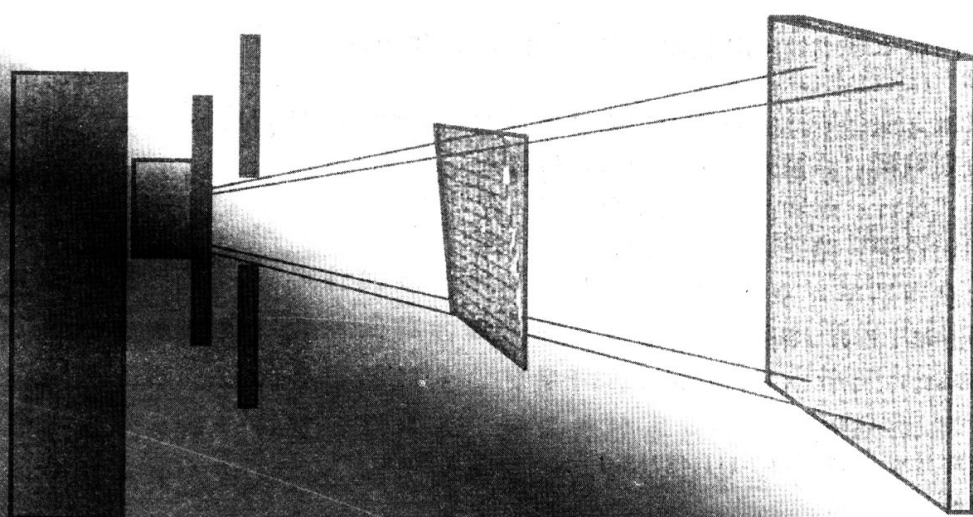


无损检测Ⅱ级、Ⅲ级培训教材

数字射线 检测技术

郑世才 王晓勇 编著

第2版



本书是为适应无损检测技术的数字射线检测技术培训而编写的培训教材。本书针对已掌握了常规射线检测技术的人员,提供系统性的工业应用数字射线检测技术基础知识,包括射线检测技术的物理基础,数字射线检测的设备、基本理论、基本技术,等价性问题,技术标准介绍等大量实际技术处理内容,并精心设计了实验项目和复习参考题。附录中深入介绍了与数字射线检测技术相关的辐射探测器、采样定理和成像过程基本理论,并给出部分复习参考题的答案。

本书适合作为数字射线检测Ⅱ、Ⅲ级人员的培训教材,书中标“*”的内容只要求Ⅲ级人员掌握,对Ⅱ级人员不要求。

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.—2版.—北京:机械工业出版社,2014.12

ISBN 978-7-111-48718-0

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第280033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

版式设计:赵颖喆 责任校对:赵蕊

封面设计:路恩中 责任印制:李洋

北京市四季青双青印刷厂印刷

2015年1月第2版第1次印刷

169mm×239mm·15.5印张·288千字

0 001—2 200册

标准书号:ISBN 978-7-111-48718-0

定价:49.00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

服务咨询热线:(010) 88361066

读者购书热线:(010) 68326294

(010) 88379203

编辑热线:(010) 88379779

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

● 前 言 ●

随着数字射线检测技术的发展和技術研究的深入，在多个行业、多种方面都在进行数字射线检测技术的应用试验、尝试性或正式应用。

2013年1月15日国际标准化组织发布了焊接接头数字射线检测技术标准——ISO 17636-2: 2013（第1版），此标准比较系统地规定了数字射线检测技术的具体控制与要求。尽管其规定的系统结构和部分主要规定还值得进一步探讨，但应该说，它对推动数字射线检测技术的工业应用具有重要作用。近年来，国内个别行业正在制定与准备发布行业的数字射线检测技术标准。

在这些数字射线检测技术标准中都明确规定，执行数字射线检测技术工作的人员，应进行补充的数字射线检测技术培训、考核与认证。为此，编写出版数字射线检测技术培训教材就成了当务之急。

本书第1版出版后，受到了工业无损检测技术界的广泛关注。其主要是从专著角度叙述了数字射线检测技术，并不适宜作为工业无损检测人员技术资格的数字射线检测技术培训教材。为满足数字射线检测技术培训及检测人员掌握数字射线检测技术的需要，本书第2版以编写成适宜作为工业应用的数字射线检测技术培训教材为目标，以构成解决实际检测问题的检测技术系统为内在线索，重新组织第1版的内容，简化、改写了一些理论性内容，补充了大量实际技术处理内容，编写了相关标准内容介绍、实验与复习参考題。将书名修改为《数字射线检测技术》。

本书针对已经掌握了常规射线检测技术的人员，提供了系统性的工业应用数字射线检测技术基本知识，适合作为数字射线检测技术培训教材。通过对本教材的学习，对于Ⅱ级人员，能依据执行的数字射线检测技术标准，正确完成数字射线检测技术工作；对于Ⅲ级人员，能面对临的数字射线检测技术问题给出正确的处理。对Ⅲ级人员所说的正确处理的主要问题是：可按执行的数字射线检测技术标准，正确选择数字射线检测系统和确定检测技术；按工件技术条件或验收标准要求，能正确选择数字射线检测技术标准，正确完成数字射线检测技术近似设计；能对数字射线检测技术系统与胶片射线照相检测技术系统做出等价性评定。

本书目前的内容是一个Ⅱ级、Ⅲ级统一的内容。系统设计按照Ⅲ级人员的能力要求。对于Ⅱ级人员培训学习，只需要略去目录中带“*”标志的章、节和段。这种设计，一是为了避免单独编写Ⅲ级教材出现过多的重复，二是也便于Ⅱ级人员形成明确的提高范围。由于某些内容并不能做出严格划分，对于Ⅱ级人员的培训学习，可能会带来一些使用中的深度、广度控制方面的问题。实验内容供培训时选择进行，它有利于学员深入理解概念和理论。各章后面的复习参考題，其中的选择题

和判断题部分，是针对Ⅱ级人员编写的，可供Ⅲ级人员参考。附录内容供希望深入了解某些问题或理论的读者参考。

理论性知识内容由郑世才编写，实验内容由王晓勇编写。

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，是作者对数字射线检测技术的理解、部分参考文献的部分研究结果、部分标准的相关规定和近几年作者的一些试验结果。机械工业出版社对本书给予了大力支持，为本书出版做了大量细致辛苦的工作，作者在此表示深切的谢意。由于作者的学识、经验所限，教材内可能存在错误，期待广大读者指正。

编者

目 录

(说明: 标有“*”的章、节、段是为Ⅲ级人员编写的内容, 对Ⅱ级人员不做要求。)

前言

第1章 射线检测技术的物理基础	1
1.1 射线概念	1
1.1.1 射线分类	1
1.1.2 X射线	2
1.1.3 γ 射线	6
1.2 射线与物质的相互作用	8
1.2.1 光电效应	8
1.2.2 康普顿效应	10
1.2.3 电子对效应	10
1.2.4 瑞利散射	11
1.3 射线衰减规律	12
1.3.1 基本概念	12
1.3.2 单色窄束射线的衰减规律	13
1.3.3 宽束连续谱射线的衰减规律	14
1.4 射线检测技术的基本原理	17
复习参考题	19
第2章 辐射探测器与其他器件	22
2.1 辐射探测器概述	22
2.1.1 辐射探测器分类	22
2.1.2 辐射探测器主要性能	24
2.1.3 辐射探测器基本性能	25
2.2 直接数字化射线检测技术的辐射探测器	26
2.2.1 概述	26
2.2.2 非晶硅辐射探测器	27
2.2.3 非晶硒辐射探测器	28
2.2.4 CCD或CMOS辐射探测器	28
*2.2.5 分立辐射探测器(DDA)的响应校正和坏像素修正	29
*2.2.6 分立辐射探测器(DDA)的性能特点	31
2.3 间接数字化射线检测技术的辐射探测器	32
2.3.1 成像板(IP板)	32
2.3.2 图像增强器	35
*2.3.3 IP板系统性能特点	36

2.4	A/D 转换器	37
2.5	射线检测的像质计与线对卡	39
2.5.1	像质计概述	39
2.5.2	常规像质计	39
2.5.3	双丝型像质计	43
2.5.4	线对卡	45
	复习参考题	47
第3章 数字射线检测技术基本理论		50
3.1	数字图像概念	50
3.2	图像数字化基本理论	52
3.2.1	图像数字化过程	52
3.2.2	采样定理	54
3.2.3	量化方法	55
3.3	数字射线检测图像质量	56
3.3.1	图像对比度	56
3.3.2	图像空间分辨率	58
*3.3.3	图像信噪比 SNR	62
*3.4	细节(缺陷)分辨能力	65
	复习参考题	67
第4章 数字射线检测基本技术		70
4.1	概述	70
4.2	探测器系统选择	71
4.2.1	概述	71
4.2.2	探测器系统选择的基本依据	72
*4.2.3	基本空间分辨率选择	73
*4.2.4	规格化信噪比选择	74
4.3	数字射线检测透照技术控制	74
4.3.1	概述	74
4.3.2	最佳放大倍数	76
*4.3.3	曝光曲线	78
*4.3.4	动态检测方式技术控制	82
4.4	数字射线检测其他技术控制	87
4.4.1	图像数字化技术控制	87
4.4.2	图像显示与观察条件	89
4.4.3	数字图像处理技术	91
4.4.4	缺陷识别与质量级别评定	95
*4.4.5	尺寸测量	96
*4.4.6	厚度测定	101
4.5	数字射线检测图像质量控制	103
4.5.1	检测图像质量指标控制	103

* 4.5.2 图像质量的补偿原则	104
* 4.6 数字射线检测技术级别近似设计	105
* 4.6.1 概述	105
* 4.6.2 检测图像常规像质计指标设计	106
* 4.6.3 检测图像不清晰度（空间分辨率）指标设计	107
* 4.6.4 例题	110
* 4.7 数字射线检测技术稳定性控制	112
* 4.7.1 概述	112
* 4.7.2 检验工艺文件（检验程序文件）	112
* 4.7.3 检测系统性能的长期稳定性试验控制	113
* 4.7.4 检测工艺卡编制	114
复习参考题	116
第5章 工业常用数字射线检测系统	119
5.1 概述	119
5.2 分立辐射探测器（DDA）数字射线检测系统	120
5.2.1 检测系统组成	120
5.2.2 DDA 检测系统的技术控制	123
5.2.3 DDA 检测系统应用特点	124
5.3 IP 板间接数字化射线检测系统——CR 系统	126
5.3.1 检测系统组成与技术基本过程	126
5.3.2 CR 系统的技术与应用特点	127
5.4 图像增强器间接数字化射线检测系统	130
5.4.1 图像增强器检测系统组成	130
5.4.2 图像增强器检测系统的技术与应用特点	130
* 5.5 微焦点数字化射线检测系统	132
* 5.6 底片图像数字化扫描技术	134
* 5.6.1 扫描仪概述	134
* 5.6.2 扫描仪的基本性能指标	135
* 5.6.3 扫描技术	137
* 5.6.4 扫描仪选用	139
复习参考题	140
* 第6章 等价性问题讨论	144
* 6.1 概述	144
* 6.2 等价指标问题分析	145
* 6.3 等价技术级别评定	146
* 6.3.1 概述	146
* 6.3.2 被检验工件基本分析	147
* 6.3.3 数字射线检测系统基本性能测定评定	149
* 6.3.4 数字射线检测系统检验试验	150
* 6.3.5 等价技术级别评定方法	152

* 6.3.6 例题	152
* 6.4 等价范围问题的理论处理方法	157
* 6.4.1 概述	157
* 6.4.2 两种射线检测技术系统概括	157
* 6.4.3 等价范围问题解答的基本理论	158
* 6.4.4 矩形函数近似线扩散函数的近似处理	160
复习参考题	162
第7章 数字射线检测技术标准介绍	163
7.1 国外数字射线检测技术标准编制概况	163
* 7.2 ASTM E2597-2007 标准关于 DDA 基本性能测定的规定	164
* 7.2.1 DDA 基本空间分辨率测定规定	164
* 7.2.2 DDA 规格化信噪比测定规定	166
* 7.3 ASTM E2737-10 标准关于 DDA 基本性能测定的规定	168
* 7.3.1 DDA 系统性能测定试验的总要求	168
* 7.3.2 试件	169
* 7.3.3 双厚(度)板与单独像质计的测定试验规定	169
* 7.4 ASTM E2446-2005 标准关于 IP 板系统基本性能测定规定	170
* 7.4.1 IP 板系统基本空间分辨率测定	171
* 7.4.2 IP 板系统规格化信噪比测量	171
* 7.5 ASTM E2445-10 标准关于 IP 板系统基本性能测定的规定	172
* 7.5.1 试验要求	173
* 7.5.2 IP 板系统基本空间分辨率测定试验	173
* 7.5.3 IP 板系统规格化信噪比测定试验	174
7.6 ISO 17636-2: 2013 标准简要介绍	174
7.6.1 ISO 17636-2: 2013 标准概况	174
7.6.2 标准规定内容的基本结构	175
7.6.3 标准主要规定内容	175
* 7.6.4 对标准等价性说明的简单分析	178
复习参考题	180
第8章 数字射线检测技术实验	182
8.1 辐射探测器系统基本性能测定实验	182
实验1 DDA 辐射探测器基本空间分辨率与 <i>MTF</i> 测定	182
实验2 DDA 辐射探测器规格化(标准、归一)信噪比测定	185
8.2 辐射探测器系统性能对缺陷检验的影响	186
实验3 DDA 辐射探测器像素尺寸对缺陷检验的影响	187
实验4 IP 板扫描读出参数对缺陷检验的影响	188
8.3 数字射线检测技术的最佳(几何)放大倍数	189
实验5 放大倍数对检测图像空间分辨率的影响	190
8.4 ISO 17636-2: 2013 标准规定的补偿规则实验	191
实验6 曝光量对检测图像质量的影响	191

附录	193
附录 A 辐射探测器介绍	193
A.1 辐射探测器的物理基础	193
A.2 气体探测器	197
A.3 闪烁探测器	199
A.4 半导体辐射探测器	204
A.5 半导体探测器的辐射损伤	209
附录 B 采样定理说明	212
B.1 采样概念	212
B.2 采样定理概念	212
B.3 采样定理讨论方法	212
B.4 采样定理确定方法	213
附录 C 成像过程基本理论	215
C.1 成像过程概念	215
C.2 成像过程的空间域分析	215
C.3 成像过程的空间频域分析	218
C.4 线扩散函数、边扩散函数与不清晰度	221
C.5 卷积概念与傅里叶变换的概念	224
附录 D 部分复习参考题答案	232
参考文献	234

第1章

射线检测技术的物理基础

说明：本章内容以Ⅱ级、Ⅲ级人员的统一要求编写。对于Ⅱ级人员，仅要求对基本知识的定性理解，具体深度控制可以参考本章的复习参考题。对于Ⅲ级人员，其中涉及射线与物质相互作用的进一步说明性内容、复杂公式导出过程是参考性知识内容。

1.1 射线概念

1.1.1 射线分类

射线是具有一定穿透物体能力的辐射。一般地，射线可以分为两类，一类是电磁辐射，另一类是粒子辐射。

电磁辐射本质上是电磁波，是在空间传播的光（量）子流。电磁辐射与物质的作用是光子与物质的相互作用。光子不带电荷，静止质量为0，在真空中沿直线以光速 c 传播。不同波长的光，其光子具有不同的能量，光子的能量为

$$\varepsilon = h\nu$$

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

ν ——频率（Hz）。

光子与一般基本粒子的本质不同是它的静止质量为0，即只有当它运动时才具有质量。按照相对论理论，其质量的大小与它的运动速度相关。

工业射线无损检测技术中使用的 X 射线、 γ 射线属于电磁辐射，它们都是具有一定能量的光子流，与可见光在本质上完全相同。但 X 射线和 γ 射线是波长很短的电磁波，它们的光子能量远大于可见光，所以在性质上与可见光又存在明显的不同。

粒子辐射是指各种粒子射线，如 α 粒子、 β 粒子、质子、电子、中子等的射线，它们都属于粒子辐射。这些粒子都具有确定的静止质量，与物质的相互作用是粒子与物质的作用。不同粒子的特性不同，与物质作用的机制和过程也不同。

两类辐射在本质上不同，在与物质相互作用时，作用的机制和过程不同，损失能量过程不同，具有各自的规律和特点，因此不能统一地进行简单讨论。也就是

说，在讨论射线与物质的相互作用时，必须指明讨论的是哪种射线。

在工业射线无损检测技术中，使用的射线主要是 X 射线、 γ 射线与中子射线，而一般的射线检测技术使用的仅是 X 射线与 γ 射线，中子射线（主要是热中子）用于一些特殊问题的检测。本书以后的讨论，所称的射线均指 X 射线与 γ 射线。

1.1.2 X 射线

X 射线由高速运动电子的轫致辐射过程产生。即电子接近原子核时，与原子核的电场作用，发生偏转、急剧减速，其动能转化为电磁辐射，产生连续谱 X 射线。轫致辐射也称为碰撞辐射。

在工业射线无损检测技术中，在 X 射线管中产生 X 射线。X 射线强度随波长的分布如图 1-1 所示。射线强度随波长分布的关系称为 X 射线谱。从图中可以看到，X 射线谱由两部分组成：连续 X 射线谱和特征 X 射线谱（标识 X 射线谱）。

连续谱是图中从最短波长开始，随着波长的加长强度连续变化的部分。特征谱是在某些波长部位叠加在连续谱上的线状谱部分。两种谱的特点不同，产生的机理也不同。

连续谱的基本特点可概括为三点：一是在连续的波长范围内存在最短波长 λ_{\min} ；二是存在辐射强度最强的波长 λ_m ；三是辐射强度分布与波长相关。

在最短波长与最强波长之间，强度随波长的增加而迅速增加；在最强波长之后，随着波长的增加强度降低；在波长较长部分强度很小。连续谱强度分布的上述特点，可以从一定能量的大量电子在靶面上的减速过程的随机性来理解。

最短波长和电子加速电压（X 射线管上施加的电压 V ）之间的关系可导出如下。电子到达阳极时具有的动能为

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = eV$$

式中 v ——电子运动速度。

设电子在一次撞击过程损失了全部的动能，按能量守恒定律，则轫致辐射产生的连续谱的最短波长和加速电压之间应有下述关系：

$$eV = h\nu = \frac{hc}{\lambda_{\min}}$$

式中 c ——光速。

代入各值，则可得到

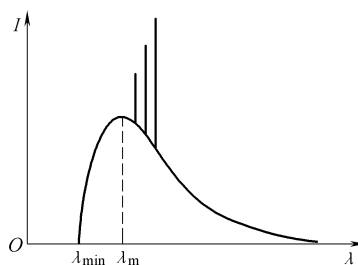


图 1-1 X 射线谱示意图

$$\lambda_{\min} = \frac{12.4}{V} \times 10^{-8} \text{ cm} \quad (1-1)$$

式中 V ——加速电压 (kV)。

通常认为, 关于连续谱 X 射线某一波长强度的关系式为

$$I(\lambda) = CZ \left(\frac{1}{\lambda_{\min}} - \frac{1}{\lambda} \right) \frac{1}{\lambda^2} + BZ^2 \frac{1}{\lambda^2}$$

式中 B 、 C ——常数。

由于常数 B 远小于常数 C (适用于波长小于 $5 \times 10^{-10} \text{ m}$ 情况), 故略去第二项, 此式变为

$$I(\lambda) = CZ \left(\frac{1}{\lambda_{\min}} - \frac{1}{\lambda} \right) \frac{1}{\lambda^2}$$

通过此式可求得最强波长与最短波长的关系。对此式求偏导数得

$$\frac{\partial I(\lambda)}{\partial \lambda} = CZ \left(\frac{3}{\lambda} - \frac{2}{\lambda_{\min}} \right) \frac{1}{\lambda^3}$$

对于强度最强的波长, 则此导数值应为 0, 即

$$\frac{\partial I(\lambda)}{\partial \lambda} = 0$$

因此有

$$CZ \left(\frac{3}{\lambda} - \frac{2}{\lambda_{\min}} \right) \frac{1}{\lambda^3} = 0$$

解此方程, 得到

$$\lambda = \frac{3}{2} \lambda_{\min}$$

即强度最强处的波长与最短波长的关系应满足上述关系。写成通常习惯的样式, 则

$$\lambda_m = \frac{3}{2} \lambda_{\min} \quad (1-2)$$

这就是连续谱的最强波长 λ_m 与最短波长之间的近似关系。

连续谱总强度与施加的管电压、管电流以及靶物质原子序数相关, 关系式为

$$I = \alpha i Z V^2 \quad (1-3)$$

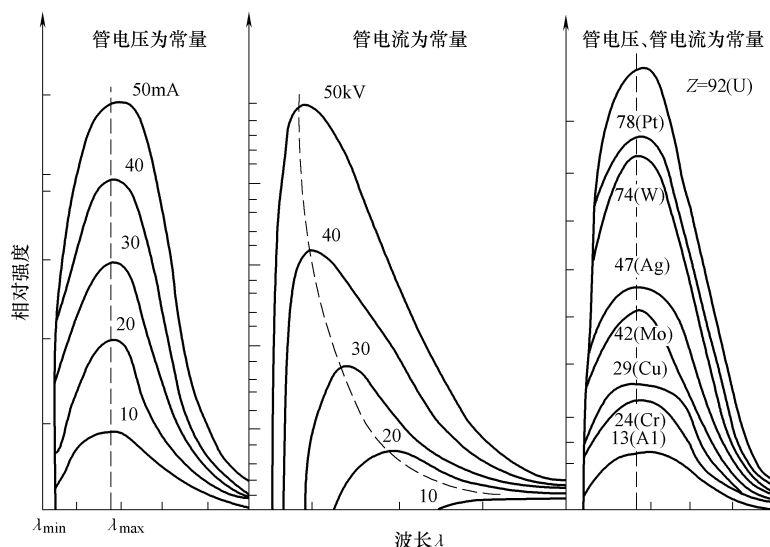
式中 i ——管电流 (mA);

Z ——靶物质的原子序数;

V ——管电压 (kV);

α ——系数, 在上述单位下约为 $(1.1 \sim 1.4) \times 10^{-6}$ 。

图 1-2 显示了连续 X 射线谱的强度与管电压、管电流和靶物质原子序数关系的基本特点。

图 1-2 连续 X 射线谱的强度与 V 、 i 、 Z 的关系

由图 1-1 可知，叠加在连续谱上的线状谱线，即仅在某些特定波长位置出现的强度很大的谱线，称为特征谱（或标识谱）。特征谱产生于跃迁辐射过程。特征谱线可由一次激发产生，即由电子激发原子的壳层电子产生。特征谱线也可由二次激发产生，即由射线光子激发原子的壳层电子产生。二次激发产生的特征辐射通常称为荧光辐射。

特征谱线是电子在轨道间跃迁时产生的辐射。当加速电压超过一临界值——靶物质的激发电压时，靶物质受电子轰击，其轨道电子可被击出，产生空位，高能量轨道电子跃迁到空位时产生辐射，这即是特征谱或标识谱。图 1-3 是特征谱线产生示意图。特征谱线可以分为系，分别命名为 K 系、L 系、M 系等特征谱线。K 系特征谱线是原子外层轨道的电子跃迁到 K 层轨道时产生的特征谱线，L 系特征谱线是原子外层轨道的电子跃迁到 L 层轨道时产生的特征谱线，M 系特征谱线是原子外层轨道的电子跃迁到 M 层轨道时产生的特征谱线，如此等等。

不同原子具有不同的轨道电子结构，因此不同元素具有不同的激发电压。只有施加的管电压超过靶物质的激发电压时，才可能产生特征谱。图 1-4 是不同元素特征谱的激发电位；表 1-1 列出了部分元素特征谱线的激发电位。

任一特征谱线的波长与发射体的原子序数相关。谱线频率与发射体原子序数间可建立如下的关系：

$$\sqrt{\nu} = C(Z - \sigma)$$

式中 C ——常数，对所有元素的同一谱线相同，但对不同谱线不同；

σ ——常数，对同一系所有谱线相同。

可见，特征谱线的频率随发射体原子序数的增加而增大，即特征谱线的波长随发射体原子序数的增加而减小。这个关系称为莫塞莱定律，如图 1-5 所示，它显示了不同发射体特征谱线的频率与波长。

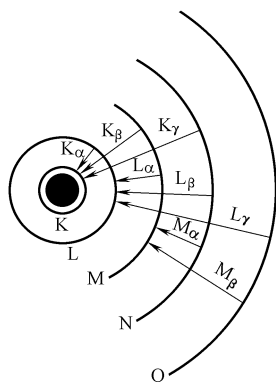


图 1-3 特征谱线产生示意图

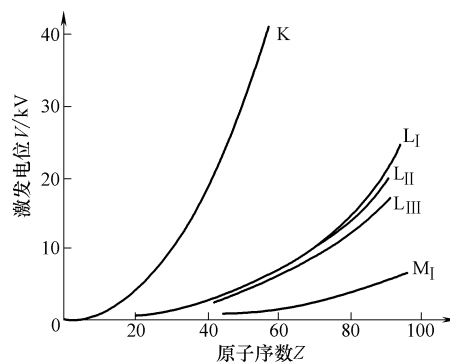


图 1-4 不同元素特征谱的激发电位

表 1-1 部分元素特征谱线的激发电位

(单位: kV)

元素	Mg	Al	Ti	Fe	Cu	W	Pb
K 系谱线激发电位	1.303	1.559	4.964	7.111	8.980	69.508	88.001
L _I 系谱线激发电位	0.063	0.087	0.530	0.849	1.100	12.090	15.870
M _I 系谱线激发电位	—	—	0.054	0.093	0.135	2.812	3.853

由于存在俄歇效应，导致电子在层间跃迁时，并不都是发射特征谱线，会出现发射俄歇电子的情况。为描述发射特征谱线的情况，在特征谱线研究中引入“荧光产额”这一术语。对于某系特征谱线，荧光产额定义为单位时间发出的该系谱线的全部光子数与同一时期内形成的该系（壳层）空位数之比。荧光产额表述的是某壳层空位被填充并发射特征谱线的概率，但不考虑该壳层空位的产生过程。图 1-6 给出的是荧光产额与元素原子序数的一般关系。

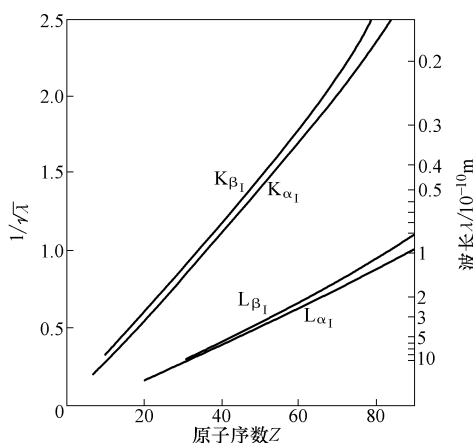


图 1-5 莫塞莱定律

物质（元素）不同，原子的电子层结构不同，特征谱线的结构也不同。由于原子的电子层具有复杂的能级结构，所以特征谱线的每一系也有复杂的结构。特征谱线的这些特点反映了物质原子结构的特点。也正是因为这点，才称这些谱线为特征谱线或标识谱线。从特征谱线的结构和波长能够识别原子的结构特点，能够识别组成材料

的元素。例如，X 射线荧光光谱分析技术，可以检查物体表面层的构成元素。

在工业射线无损检测技术中，一般不考虑特征谱线。

1.1.3 γ 射线

γ 射线是波长很短的电磁波，为线状谱射线。 γ 射线穿透物体的能力很强，有的甚至可以穿透几厘米厚的铅板，但它的电离作用却很小。简单说， γ 射线是放射性同位素的原子核发生衰变过程中，处于激发态的核在向低能级的激发态或基态跃迁过程中产生的辐射。显然， γ 射线的产生过程不同于 X 射线的产生过程。不同的原子核具有不同的能级结构，所以不同的放射性元素辐射的 γ 射线具有不同的能量。

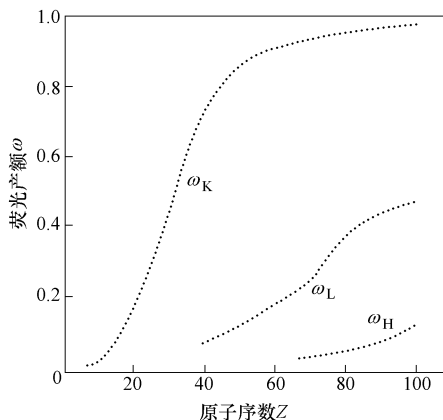
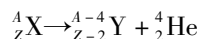


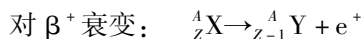
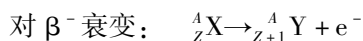
图 1-6 荧光产额与元素原子序数的一般关系

核素（原子核）自发地放射出射线而转变为另一种核素（原子核）的现象，称为放射性衰变。在衰变的过程中电荷数和质量数保持守恒。放射性衰变的主要方式是 α 衰变、 β 衰变及 γ 衰变，此外还有轨道电子俘获 (ε 或 EC)、自发裂变 (SF) 等。

α 衰变是指原子核放出 α 粒子的衰变过程。 α 粒子带有两个单位的正电荷，质量数为 4，实际就是氦原子核。它穿透物体的能力很小，在空气中也只能飞行几个厘米，但具有很强的电离能力。以 X 表示原来的核，以 Y 表示衰变后的核，则 α 的衰变过程可写成



β 衰变是指原子核放出 β 粒子的衰变过程。 β 粒子是负电子流或正电子流，它具有较大的穿透能力，甚至可以穿透几毫米厚的铝，但电离作用较弱。放出负电子流的称为“ β^- 衰变”，放出正电子流的称为“ β^+ 衰变”。在 β^- 衰变中，核内的一个中子转变为质子。在 β^+ 衰变中，核内的一个质子转变为中子。 β 衰变可写成如下形式：



在 β 衰变中放出的电子的能量在一个范围内是连续分布的，有一个确定的最大能量。

当一种放射性元素发生连续衰变时，有的过程是 α 衰变，有的过程是 β 衰变，在这些衰变过程中常伴随辐射 γ 射线。这是由于放射性元素的核，经过上述衰变后变成处于激发态的核，当它返回正常态时将辐射 γ 射线，这个过程称为 γ 衰变（也称为 γ 跃迁）。

原子核从激发态向低能态或基态跃迁，除了发射 γ 射线外，还可以通过发射电子的方式完成。在发射电子的方式中，处于激发态的原子核把激发能传给轨道电子，使轨道电子发射出来，同时实现原子核的能态跃迁。这个过程称为内转换，发射的电子称为内转换电子。

轨道电子俘获是指原子核从核外的轨道电子中俘获一个轨道电子的衰变过程。俘获轨道电子后原子核的一个质子转变成中子，生成质量数与母核相同但原子序数前移一位的新核。在轨道电子俘获后，由于在内层轨道上出现电子空位，因此轨道电子俘获一般伴随特征 X 射线发射或俄歇电子发射。通常认为轨道电子俘获是 β 衰变中的一种过程。

放射性原子核的衰变过程是自发进行的，但衰变过程遵循一定的统计规律。实验表明，对于同种放射性元素，它的每个原子核发生衰变的可能性是相同的，但不是同时发生衰变，在很短的时间间隔内，衰变的原子数与存在的原子数成正比。即在很短的时间 Δt 内如果有 ΔN 个原子核发生衰变，则它们满足下面的关系：

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t$$

式中的负号表示衰变后原子核数减少。对此式积分，则得到放射性衰变规律，即

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1-4)$$

式中 N_0 ——初始时刻 ($t=0$) 放射性物质未发生衰变的原子核的数量；

N —— t 时刻放射性物质尚未发生衰变的原子核的数量；

t ——经过的衰变时间；

λ ——衰变常数。

可见，原子核的减少服从指数衰减规律，即放射性衰变服从指数衰减规律。

衰变常数是表征原子核衰变快慢的物理量，其物理意义是单位时间内原子核发生衰变的概率。不同种类的原子核衰变常数不同，也就是说，它们衰变的速率不同。

实际应用中，经常采用半衰期描述放射性衰变的快慢。半衰期表示放射性原子核数目减少至原来数目一半时所需的时间，通常采用符号 $T_{1/2}$ 表示半衰期。按照半衰期的定义可以得到

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1-5)$$

放射性衰变是一个自发进行的过程，放射性元素的衰变方式和速率由原子核本身的性质决定，与原子核所处的物理状态或化学状态无关，外界条件（如温度、压力等）也不能改变它的衰变方式和速率。

图 1-7 是 Co-60、Cs-137 和 Tm-170 的衰变方式。从图中可见，Co-60 的衰变过程是先经过一次 β 衰变，然后再经过两次 γ 衰变，变为稳定的 Ni-60。Cs-137 的衰变过程则有两种：一种是只经过一次 β 衰变就变为稳定的 Ba-137；另一种是先经过一次 β 衰变，再经过一次 γ 衰变变为稳定的 Ba-137。Tm-170 的衰变过程也有两

种：一种是只经过一次 β 衰变（76%）就变为稳定的 Yb-170；另一种是先经过一次 β 衰变（24%），再经过一次 γ 衰变变为稳定的 Yb-170（或者再经过一次发射特征 X 射线变为稳定的 Yb-170）。

不同放射性元素的半衰期差别也很大，例如，放射性元素 Co-60 的半衰期为 5.3 年，而放射性元素 Ir-192 的半衰期仅为 74 天。这些都是它们固有的，不能通过某些方法、手段加以控制或改变。

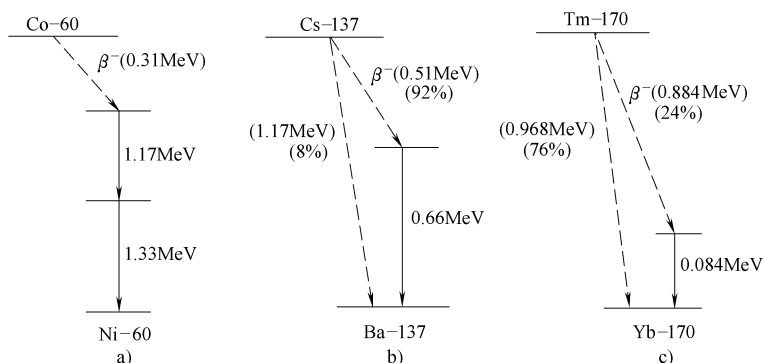


图 1-7 放射性衰变方式

从上面叙述的一些放射性同位素的衰变过程可以清楚看到，两个不同放射性同位素的源，即使活度相等，它们辐射的射线强度也并不一定相等。例如，同为 100Ci ($1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{Bq}$) 的 Co-60 和 Tm-170 源，Co-60 源在一个核衰变中放出两个 γ 射线光子，而 Tm-170 源在一个核衰变中仅有 24% 的可能放出一个 γ 射线光子。

1.2 射线与物质的相互作用

当 X 射线、 γ 射线穿过物体时，将与物质发生复杂的相互作用。这些作用从本质上说是光子与原子、原子的电子、自由电子及原子核的相互作用。其中主要的作用是：光电效应、康普顿效应、电子对效应和瑞利散射。由于这些相互作用，一部分射线被物质吸收，一部分射线被散射，使穿透物体的射线强度减弱。

1.2.1 光电效应

射线在物质中传播时，入射光子与原子的轨道电子相互作用，把全部能量传递给这个轨道电子，获得能量的电子克服原子核的束缚成为自由电子，入射光子消失，这种作用过程称为光电效应。发生光电效应的条件是，入射光子的能量大于轨道电子与原子核的结合能。如果入射光子的能量小于轨道电子与原子核的结合能，则不能发生光电效应。图 1-8 是光电效应示意图。

在光电效应中，释放的自由电子称为光电子。光电子发射的方向与入射光子的

能量相关，当入射光子的能量较低时，光电子主要分布在与入射光子方向垂直的方向上；随着入射光子能量的增大，光电子的发射方向逐渐倾向于入射光子的方向。图 1-9 是光电子上述分布特点的图示。

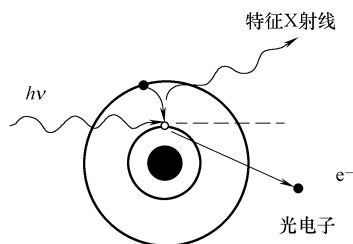


图 1-8 光电效应示意图

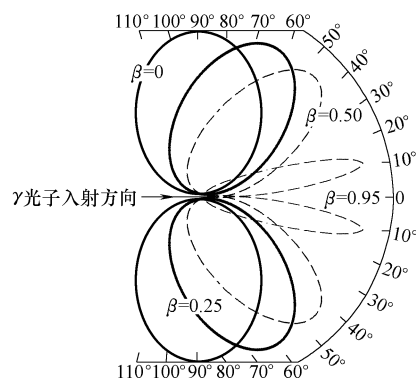


图 1-9 光电效应中光电子的分布

当发生光电效应时，在电子层中将产生空位，这将使原子处于不稳定的状态，因此外层电子将向存在空位的电子层跃迁，使原子回到稳定的状态。在跃迁过程中，将产生跃迁辐射，发射特征 X 射线。这种辐射通常称为荧光辐射。伴随发射特征 X 射线（荧光辐射）是光电效应的重要特征。

在较高能级的轨道电子填充空位时，可能发生的另一过程是俄歇效应，如图 1-10 所示。即较高能级的轨道电子填充空位时所释放的能量，可以激发外层轨道电子，使其成为自由电子，一般称为俄歇电子。对轻元素更容易发生俄歇效应。

光电效应主要发生在入射光子与原子内层轨道电子的相互作用过程中。光电效应的发生概率与元素原子序数的 5 次方成正比，当射线能量增大时，发生概率降低（约与光子能量的 $7/2$ 次方成反比）。对低原子序数物质，当光子能量超过 100keV 时光电效应可以忽略；对高原子序数物质，光子能量直到约 2MeV 时对射线吸收光电效应仍是最主要的作用。图 1-11 是光电效应与光子能量关系的示意图。

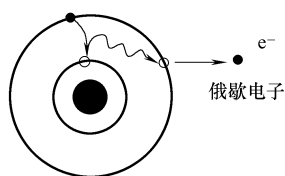


图 1-10 俄歇效应示意图

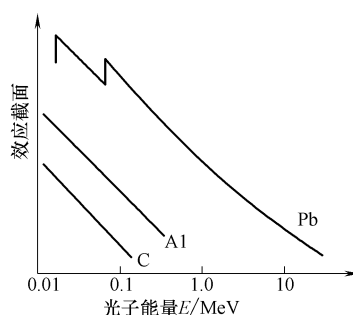


图 1-11 光电效应与光子能量的关系

低能光子与高原子序数物质发生相互作用时，光电效应具有重要意义。

1.2.2 康普顿效应

入射光子与受原子核束缚较小的外层轨道电子或自由电子发生的相互作用称为康普顿效应，也常称为康普顿散射，如图 1-12 所示。在这种相互作用过程中，入射光子与原子外层轨道电子碰撞之后，一部分能量传递给电子，使电子从原子的电子轨道飞出，这种电子称为反冲电子。同时，入射光子的能量减少，成为散射光子，并偏离了入射光子的传播方向。

当入射光子的能量很低并与自由电子相互作用时，入射光子的能量将不改变，而仅仅改变其方向，这个作用过程是非常次要的相互作用过程。

康普顿效应的发生概率与元素原子序数的 1 次方成正比，对主要射线能量范围，发生概率与射线能量成反比。对中等能量的光子，康普顿效应对各种元素都是主要的作用。图 1-13 是康普顿效应与光子能量关系的示意图。

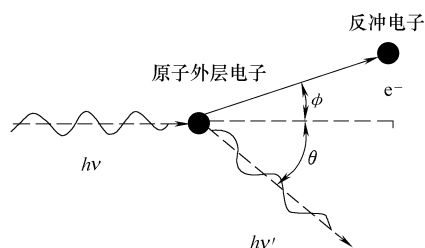


图 1-12 康普顿效应示意图

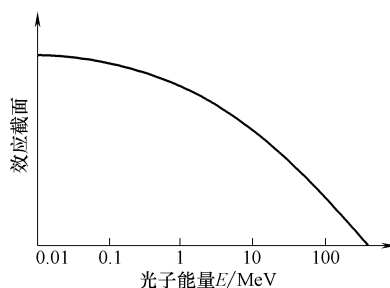


图 1-13 康普顿效应与光子能量的关系

在康普顿效应中，反冲电子和散射光子的方向都相关于入射光子的能量。随着入射光子能量的增加，反冲电子和散射光子的偏离角都减少，散射线波长将增长。图 1-14 显示了康普顿效应中散射线强度的空间分布与光子能量的关系。可见，对于低能入射光子，散射线强度在不同方向差别很小，但随着入射光子能量的增加，在入射光子方向的散射线强度将远大于背向散射线强度。

1.2.3 电子对效应

高能量光子入射到物质中时，与物质的原子核发生相互作用，光子放出全部能量，转化为一对正、负电子，这就是电子对效应，如图 1-15 所示。在电子对效应中，入射光子消失，产生的正、负电子对在不同方向飞出，其方向与入射光子的能量相关。

电子对效应只能发生在入射光子的能量不小于 1.02MeV 时。这是因为电子的静止质量相当于 0.51MeV 能量，根据能量守恒定律，只有入射光子的能量不小于

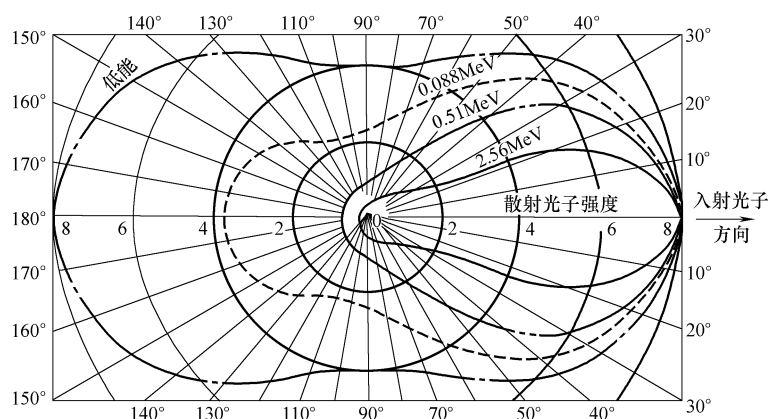


图 1-14 康普顿效应中散射线强度的空间分布与光子能量关系

1.02MeV 时才可能转化为一对正、负电子，多余的能量将转换为电子的动能。

入射光子与原子的电子发生作用也可以产生电子对效应，但其发生的可能性远小于入射光子与原子核的相互作用过程，并且入射光子的能量应不小于 2.04MeV。

电子对效应发生的可能性与物质原子序数的平方成正比，近似与光子能量的对数成正比，因此电子对效应在光子能量较高、原子序数较高时是一种重要的作用。图 1-16 是电子对效应与光子能量关系的示意图。

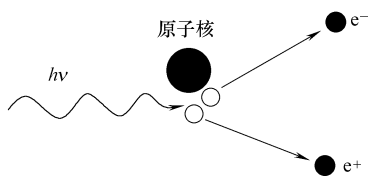


图 1-15 电子对效应示意图

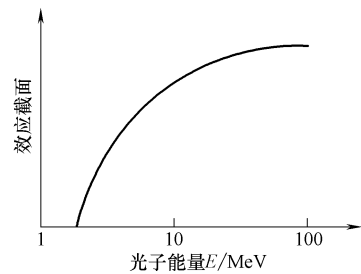


图 1-16 电子对效应与光子能量关系的示意图

在电子对效应中产生的正电子寿命很短，在它运动快要停止时将与负电子结合，转化为两个能量为 0.51MeV 的光子。

1.2.4 瑞利散射

瑞利散射是入射光子与原子内层轨道电子作用的散射过程。在这个过程中，一个束缚电子吸收入射光子后跃迁到高能级，随即又释放一个能量约等于入射光子能量的散射光子，光子能量的损失可以不计。简单说，也可以认为这是光子与原子发生的弹性碰撞过程。

瑞利散射发生的可能性与物质的原子序数和入射光子的能量相关，约与原子序数的平方成正比，并随入射光子能量的增大而急剧减小。对于原子序数高的元素和低能射线，它是一种重要作用，但在总的衰减中，它不会超过 20%。

对上面各种作用的讨论进行归纳，可以得到下面的结论：射线与物质的相互作用与射线的能量相关，也与组成物质元素的原子序数相关。图 1-17 概括了光电效应、康普顿效应、电子对效应发生的相对程度与光子能量和物质元素原子序数的关系。

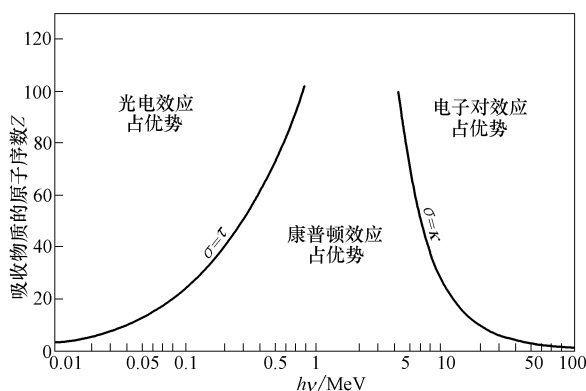


图 1-17 主要作用发生的相对关系

1.3 射线衰减规律

1.3.1 基本概念

X 射线、 γ 射线穿过物体时，由于与物质发生复杂的相互作用，使部分能量被吸收、部分能量被散射，导致穿透物体的射线强度减弱，称为射线强度发生了衰减。在讨论射线衰减规律时，必须区分单色射线和连续谱射线，必须区分宽束射线和窄束射线。

单色射线是能量（波长）单一的射线，连续谱射线是由能量（波长）连续分布在一个范围的射线。如果到达探测器的射线只有一次射线（即从射线源发射的射线穿过物体，未发生相互作用到达探测器），则称为窄束射线；如果到达探测器的射线除了一次射线外还含有散射线，则称为宽束射线。图 1-18 是窄束射线和宽束射线的示意图。

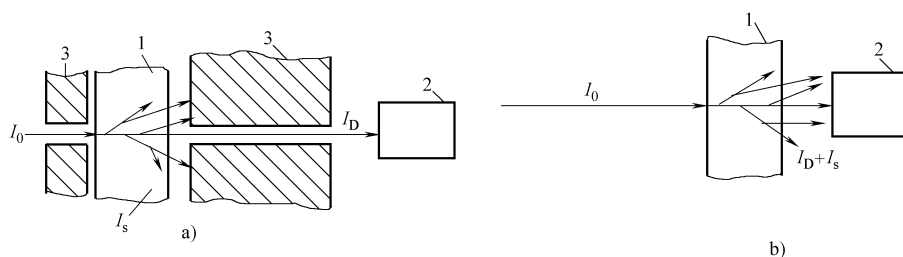


图 1-18 窄束射线和宽束射线的示意图

a) 窄束射线 b) 宽束射线

1—物体 2—探测器 3—准直器

1.3.2 单色窄束射线的衰减规律

实验表明,射线穿透物体时其强度的衰减与吸收体(射线入射的物体)的性质、厚度及射线光子的能量相关。对单色窄束射线,在均匀的媒质中,在很小的厚度范围内,强度的衰减量正比于入射射线的强度和穿透物体的厚度。按照图 1-19 所示的符号,可以写出

$$\Delta I = -\mu I \Delta T$$

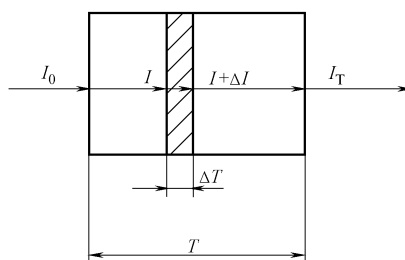


图 1-19 单色窄束射线的衰减规律

对此式积分,则可得到通常所写的关系

$$I = I_0 e^{-\mu T} \quad (1-6)$$

式中 I_0 ——入射射线强度;

I ——透射射线强度;

T ——吸收体厚度;

μ ——线衰减系数。

这就是单色窄束射线的衰减规律,也就是射线衰减的基本规律。

这个公式指出,射线穿过物体时的衰减程度,相关于射线本身的能量,相关于所穿透的物体厚度。由于以指数规律相关于所穿透的物体厚度,因此随着厚度的增加透射射线强度将迅速减弱。

在衰减规律表示式中出现的线衰减系数是一个重要的系数。入射到物体中的射线光子,在穿行一段距离时,有的与物质发生了相互作用,有的没有与物质发生相互作用,线衰减系数表示的就是入射光子在物体中穿行单位距离时(例如 1cm),平均发生各种相互作用的可能性。它表征了射线穿透物体时强度衰减的特点。

在理论上常用质量衰减系数,即线衰减系数除以物质密度所得到的值,常记为 μ_m , 这样有

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-7)$$

式中 ρ ——物质密度。

如果将所描述的各种相互作用按照吸收和散射分析,则线衰减系数可以简写成

$$\mu = \tau + \sigma$$

式中 τ ——线吸收系数;

σ ——线散射系数。

相应地也可以写出

$$\mu_m = \tau_m + \sigma_m$$

实验研究指出，对于常用的能量和常见的物质，在射线的吸收限之间近似有

$$\mu_m = kZ^3 \lambda^3$$

式中 k ——系数；

Z ——吸收体元素的原子序数；

λ ——入射射线的波长。

这个关系式具体地表示了质量衰减系数与物质原子序数和射线波长（射线能量）的关系。它表明，对同样能量的射线，物质的原子序数越大，射线在物体中受到的衰减也越大；对不同能量的射线，当穿过同一种物体时，能量低的射线将受到更大的衰减。图 1-20 是部分元素的质量衰减系数与射线能量的关系。

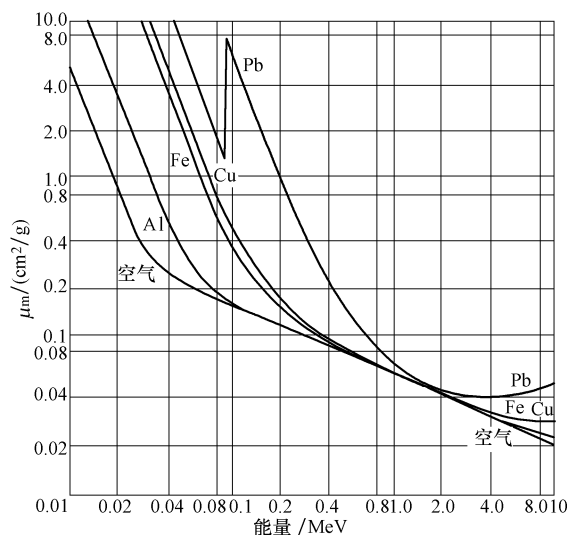


图 1-20 质量衰减系数与射线能量的关系

在实际应用中，常引入半值层（半值层厚度、半厚度）描述吸收体对一定能量射线的衰减，记为 $T_{1/2}$ 。半值层定义为使入射射线强度减少至 1/2 的吸收体厚度。按定义容易得到

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu} \quad (1-8)$$

用半值层概念，可将射线衰减规律写成意义简洁、容易记忆的其他形式

$$I = I_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{T/T_{1/2}} \quad (1-9)$$

1.3.3 宽束连续谱射线的衰减规律

对于实际的射线检测技术，一般都是宽束射线情况，因此应讨论的是宽束连续

谱射线的衰减规律。

对于宽束连续谱射线的处理，一是引入等效波长，将连续谱转化为单色射线；二是引入散射比，处理宽束射线情况。等效波长对应的单色射线，其半值层厚度应与连续谱射线的半值层厚度相同。散射比则定义为到达探测器的散射线强度与一次射线强度的比，记为 n ，它等于

$$n = I_s / I_D \quad (1-10)$$

式中 I_D ——一次射线强度；

I_s ——散射射线强度。

这样，宽束连续谱射线的衰减规律则可如下导出。

对于宽束连续谱射线，透射射线强度应为一次射线和散射射线强度之和，即

$$I = I_D + I_s$$

于是可写

$$I_D = I_0 e^{-\mu T}$$

$$I_s = n I_0 e^{-\mu T}$$

$$I = I_D + I_s = (1 + n) I_0 e^{-\mu T} \quad (1-11)$$

式中 I_0 ——射线入射强度；

n ——散射比；

μ ——线衰减系数；

T ——吸收体厚度。

其中，线衰减系数 μ ，是对应于射线等效波长的线衰减系数。在理论研究中，常引入积累因子，记为 B ，即

$$B = 1 + I_s / I_D$$

这样，又可写出

$$I = B I_0 e^{-\mu T} \quad (1-12)$$

图 1-21 是实验得到的宽束连续谱射线穿过一定厚度物体的吸收曲线，图 1-22 具体给出了宽束连续谱射线穿过一定厚度物体的吸收特点。从图中曲线可以看到，在最初的一段厚度区内，曲线的斜率不断改变，当厚度达到一定值（ B 点）以后，曲线的斜率几乎不再改变，曲线近似成为直线。吸收曲线的这个变化情况反映的是，宽束连续谱射线穿透物体时，其长波部分（能量较低部分）被更多吸收的情况。因此随着穿透物体厚度增大，连续谱射线的等效能量将逐步增大，这通常称为连续谱射线发生“硬化”。

宽束连续谱射线穿过一定厚度物体的上述吸收特点，可从宽束连续谱射线的衰减规律给出说明。

前面给出，对于连续谱 X 射线，其强度衰减规律通常简单写成

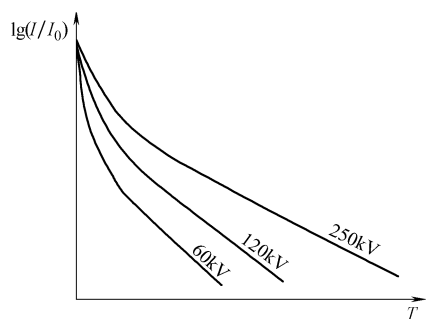


图 1-21 宽束连续谱射线的吸收曲线

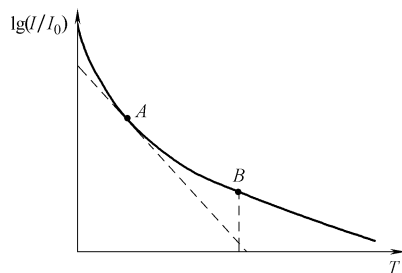


图 1-22 宽束连续谱射线的吸收特点

$$I = I_0(1 + n)e^{-\mu T}$$

从此式可以得到

$$\lg\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\mu \lg e T + \lg(1 + n)$$

从此式可以看到，对于曲线的每一点，其基本特性可由该点的切线方程表述。该切线方程可写为

$$\lg\left(\frac{I}{I_0}\right) = kT + b$$

$$k = -\mu \lg e = -0.434\mu$$

$$b = \lg(1 + n)$$

显然，切线的斜率与线衰减系数仅相差一个常数 -0.434 ，而切线的截距则可认为由散射比的对数决定。因此吸收曲线反映了宽束连续谱射线吸收过程中线衰减系数和散射比的变化。

线衰减系数随吸收厚度的变化，就是我们经常所说的宽束连续谱射线穿透物体时的“硬化”。由于硬化，连续谱的等效波长减小，半值层厚度会增大，因此第一半值层将会小于第二半值层。表 1-2 给出了部分恒压连续谱 X 射线的第一半值层和第二半值层（同质系数为第一半值层与第二半值层的比值）。

表 1-2 部分恒压连续谱 X 射线的半值层

管电压/kV	第一半值层/mm		第二半值层/mm		同质系数	
	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu
100	6.56	0.30	8.05	0.47	0.81	0.64
200	14.7	1.70	15.5	2.40	0.95	0.71
250	16.6	2.47	17.3	3.29	0.96	0.75

从宽束连续谱射线吸收曲线，可以求出宽束连续谱射线穿过一定厚度物体时的等效线衰减系数 $\bar{\mu}$ 。在吸收曲线图中取距离很小的两点，设它们对应的厚度分别为 T_1 和 T_2 ，对应的透射射线强度分别为 I_1 和 I_2 。则按射线的衰减规律有

$$I_1 = (1 + n)I_0 e^{-\bar{\mu}T_1}$$

$$I_2 = (1 + n)I_0 e^{-\bar{\mu}T_2}$$

因此有

$$\frac{I_2}{I_1} = e^{-\bar{\mu}(T_2 - T_1)}$$

两边取对数

$$\ln \frac{I_2}{I_1} = -\bar{\mu}(T_2 - T_1)$$

因此有

$$\bar{\mu} = -\frac{\ln(I_2/I_1)}{(T_2 - T_1)}$$

因此如果 $I_2 = I_1/2$ ，则 T_1 和 T_2 的厚度差将等于对应的半值层厚度。这样，从半值层厚度即可求出此时的等效线衰减系数。

宽束连续谱射线的吸收规律与特点，是理解射线检测技术中一些具体问题的基础。

1.4 射线检测技术的基本原理

当强度均匀的射线束照射物体时，如果物体局部区域存在缺陷或结构存在差异，它将改变物体对射线的衰减，使得不同部位透射射线强度不同，这样，采用一定的辐射探测器检测透射射线强度，就可以判断物体内部的缺陷和物质分布等。

以阶梯块上的很小厚度差进行检测原理讨论，如图 1-23 所示。

设： μ ——阶梯块物质的线衰减系数；

I_0 ——入射射线强度；

I_D, I'_D ——阶梯块上不同部位透射的一次射线强度；

I_S, I'_S ——阶梯块上不同部位透射的散射射线强度；

I, I' ——阶梯块上不同部位透射射线总强度。

由于

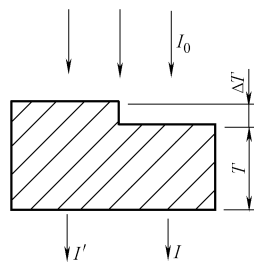


图 1-23 射线检测的基本原理

$$I = I_D + I_S; \quad I' = I'_D + I'_S$$

并由于 ΔT 远小于 T ，因此可认为

$$I_S = I'_S$$

所以有

$$\begin{aligned} \Delta I &= I' - I = I'_D - I_D \\ \frac{\Delta I}{I} &= \frac{I'_D - I_D}{I_D + I_S} = \frac{(I'_D/I_D) - 1}{1 + n} \end{aligned}$$

对一次射线，可按单色窄束射线衰减规律写出

$$\begin{aligned} I_D &= I_0 e^{-\mu T} \\ I'_D &= I_0 e^{-\mu(T + \Delta T)} \end{aligned}$$

因此有

$$\frac{I'_D}{I_D} = e^{-\mu \Delta T}$$

引用近似公式

$$e^x = 1 + x \quad (|x| < 1)$$

则有

$$e^{-\mu \Delta T} = 1 - \mu \Delta T$$

代入 $\Delta I/I$ 的表示式，则有

$$\frac{\Delta I}{I} = -\frac{\mu \Delta T}{1 + n} \quad (1-13)$$

当 ΔT 是缺陷，其线衰减系数为 μ' 时，则式 (1-13) 应改写为

$$\frac{\Delta I}{I} = -\frac{(\mu - \mu') \Delta T}{1 + n} \quad (1-14)$$

“ $\Delta I/I$ ”称为“物体对比度”，它构成了射线检测技术需要探测的信号。式 (1-13) 即是射线检测技术的基本原理关系式，它给出了一个小厚度差与对应的射线检测物体对比度之间的关系。从该式可见，射线对缺陷的检测能力，与采用的射线能量、缺陷在射线透照方向上的尺寸、散射线的控制情况等相关。

射线检测技术基于物体对比度，采用辐射探测器拾取这个物体对比度信号，并将它转换成射线检测图像，从图像信息作出判断结论。不同的射线检测技术，采用不同的辐射探测器拾取物体对比度信号，通过不同的过程完成物体对比度信号到射线检测图像的转换。不同类型的数字射线检测技术，采用的辐射探测器不同，完成物体对比度信号到射线检测图像的转换过程不同，但共同的特点是，最终获得的是数字化的射线检测图像。

复习参考题

一、选择题（每题的四个选项中只有一个正确答案，请将正确答案的序号填在题末括号内）

1. 下列关于光（量）子的叙述中，存在错误的是（ ）。
A. 静止质量很小
B. 不带电荷
C. 能量与频率相关
D. 在真空中沿直线以光速传播
2. 对于放射性同位素，下面列出的决定其半衰期长短的因素中，正确的是（ ）。
A. 放射性同位素本身的性质
B. 放射性同位素放出射线的能量
C. 放射性同位素放出射线的强度
D. 外界的温度和压力条件
3. 下列关于 X 射线的叙述中，存在错误的是（ ）。
A. X 射线本质上也是电磁波
B. 传播不受电场和磁场的影响
C. 在吸收物体中沿直线以光速传播
D. 能够损伤生物组织
4. 在工业射线检测中所使用的 γ 射线源，下面给出的决定其穿透能力的因素中，正确的是（ ）。
A. γ 射线源的种类
B. γ 射线源的活度
C. γ 射线源的尺寸
D. γ 射线源的半衰期
5. 某放射性同位素，经过 150 d（天）后，其放射性活度变为初始值的 1/8。下面给出的该放射性同位素的衰变常数中，正确的是（ ）。
A. 0.014 d^{-1}
B. 0.020 d^{-1}
C. 0.028 d^{-1}
D. 0.030 d^{-1}
6. 在射线与物质的相互作用效应中，作用中入射射线光子的能量部分被吸收、部分被散射，下面给出的属于这种作用的效应中，正确的是（ ）。
A. 光电效应
B. 康普顿效应
C. 电子对效应
D. 瑞利散射
7. 在射线与物质的相互作用过程中，特点之一是过程中总伴随有荧光辐射。下面给出的具有这种特点的效应，正确的是（ ）。
A. 光电效应
B. 康普顿效应
C. 电子对效应
D. 瑞利散射
8. 对于产生连续谱 X 射线，下面列出的辐射过程中，正确的是（ ）。
A. 荧光辐射
B. 轫致辐射
C. 跃迁辐射
D. 电离辐射
9. 对在 X 射线管中产生的 X 射线谱，下面给出的叙述中，错误的是（ ）。
A. X 射线谱表示 X 射线强度随波长分布的关系
B. X 射线谱由连续 X 射线谱和特征 X 射线谱两部分组成
C. 特征 X 射线谱是线状谱部分
D. 连续谱 X 射线强度随波长增加而增大

10. 对于连续谱 X 射线穿过一定厚度物体后发生的“硬化”现象, 下面给出的表述发生变化的叙述中, 正确的是 ()。

- A. 连续谱 X 射线的最短波长变短 B. 连续谱 X 射线的最长波长增长
C. 连续谱 X 射线的等效波长变短 D. 连续谱 X 射线的最强波长增长

11. 连续谱 X 射线透过一定厚度的某物体时, 下面给出的第一半值层与第二半值层厚度的关系中, 正确的是 ()。

- A. 第一半值层大于第二半值层 B. 第一半值层小于第二半值层
C. 第一半值层等于第二半值层 D. 无确定相对大小关系

12. 对于管电压为 100kV 的 X 射线, 下列元素中吸收系数最大的是 ()。

- A. 铝 B. 钛 C. 镁 D. 铁

13. 某能量 X 射线在铁中的吸收系数为 0.8cm^{-1} , 下面给出的其半值层厚度中, 正确的是 ()。

- A. 0.25cm B. 0.4cm C. 0.866cm D. 1.008cm

14. 下列关于单色 X 射线的衰减系数与试件厚度关系的叙述中, 正确的是 ()。

- A. 衰减系数随厚度增加单调减少 B. 衰减系数随厚度增加单调增大
C. 衰减系数随厚度增加周期性增加 D. 衰减系数不随厚度增加改变

二、判断题 (正确的画√, 错误的画×)

1. 工业射线检测应用射线可分为电磁辐射和粒子辐射。常用的 X 射线、 γ 射线和中子射线, 都属于电磁辐射。 ()

2. 从 X 射线管辐射的连续谱 X 射线的最短波长取决于所施加的管电压。 ()

3. 各种人工放射性同位素源, 在核的每次放射性衰变中, 都可以辐射出 γ 光子, 但不同放射性同位素源辐射的 γ 光子的能量不同。 ()

4. 在光子与物质的相互作用中, 由于入射光子的能量被吸收、散射, 导致透射射线强度降低。 ()

5. 对 200kV 的连续谱 X 射线, 在穿透它可穿透的较大厚度的某物体时, 其线衰减系数随穿透厚度增加而增加。 ()

6. 对入射到物体的 X 射线, 采取一定的措施, 使其照射范围限制在较小的区域, 则可以得到窄束射线情况。 ()

7. 连续谱 X 射线在穿透一定厚度的物体后, 其最短波长将减小, 穿透物体的能力提高。 ()

8. 射线检测的物体对比度, 与物体对射线的吸收特性相关, 与采用的射线能量、散射线控制情况相关。 ()

三、计算题

1. 一放射性同位素经过 100 天后，其放射性活度变为初始值的 $1/4$ ，求该放射性同位素的衰变常数。
2. 某 γ 射线源，其钢的半值层厚度为 5.0mm，在不考虑散射线时，求其穿过 6mm 与穿过 12mm 厚度的钢板后的透射射线强度之比。

四、问答题

1. 简单说明射线概念。
2. 简单说明连续谱 X 射线强度分布有哪些特点。
3. 简述电磁辐射与物质相互作用的主要过程。
4. 试述 X 射线和 γ 射线穿过物体时的衰减规律。
5. 说明连续谱射线穿过一定厚度时的吸收规律特点。
6. 连续谱射线穿过一定厚度的物体后发生了哪些变化？简述产生这些变化的原因。
7. 完成物体对比度公式导出。

第2章

辐射探测器与其他器件

说明：本章内容基本是以Ⅱ级人员的要求编写。对于Ⅲ级人员仅增加个别小节内容。希望了解更多关于辐射探测器知识内容时可参阅附录 A。

2.1 辐射探测器概述

2.1.1 辐射探测器分类

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器件，是影响获得检测图像质量的基本因素。目前，用于工业数字射线检测技术的辐射探测器，按原理可分为三类：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，利用辐射可以使气体电离实现辐射探测。辐射与气体作用，损失的能量使气体电离，电离产生的离子对在电场作用下形成电离电流，测量电离电流实现对辐射的探测。图 2-1 是其探测原理示意图。电离产生的离子对数与气体类别、辐射类型和能量相关。

气体探测器的基本结构，是在一定气压的容器中安装两个同轴电极（由绝缘体分开），它们之间加上一定的高压。气体辐射探测器的主要类型有电离室、正比计数器和 G-M 计数器等。

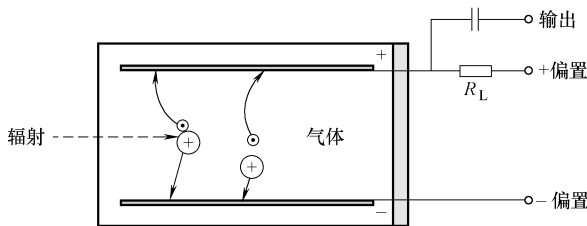


图 2-1 气体辐射探测器原理示意图

2. 闪烁辐射探测器

闪烁辐射探测器采用闪烁体作为探测介质，利用闪烁体的闪烁现象探测辐射。即辐射照射闪烁体时，闪烁体吸收辐射的能量，并把吸收的部分能量以光的形式辐射出来。对光信号（转换为电信号）实施探测，则可实现对射线的探测。

闪烁现象是指高能粒子照射物质时引起瞬时闪光的现象，可以产生闪烁现象的物质称为闪烁体，闪光持续时间一般不大于 10^{-6}s 。闪烁现象实际是入射射线所损失的能量使电子跃迁，电子从激发态跃迁到基态时释放能量，形成荧光辐射或磷光辐射。荧光辐射是辐射照射后在很短时间发生的辐射，磷光辐射是吸收和发射之间延迟比较长的辐射。常用的闪烁晶体是碘化钠、碘化铯、锗酸铋、钨酸钙和钨酸镭等。

闪烁辐射探测器由闪烁（晶）体、电子倍增器件、电路组成。电子倍增过程可以采用不同器件、不同方式，从此构成不同的闪烁辐射探测器。例如，光电倍增管、图像增强器、微通道板等。

3. 半导体辐射探测器

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。当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，通过检测电信号实现对辐射的探测。半导体辐射探测器的基本结构是 PN 结。图 2-2 是半导体探测器的探测原理示意图。

按照上述原理，可以构成不同的辐射探测器。对直接数字化射线检测技术，实际使用的辐射探测器主要有非晶硅探测器、非晶硒探测器、CCD（电荷耦合器件）或 CMOS（互补金属氧化物半导体）辐射探测器，个别的也有气体探测器。它们常统称为数字辐射探测器阵列，常用缩写 DDA 表示。对间接数字化射线检测技术，实际使用的辐射探测器主要是成像板（IP 板）、图像增强器等。

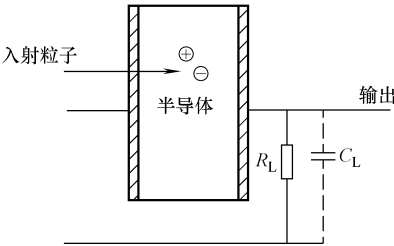


图 2-2 半导体探测器的探测原理示意图

数字射线检测技术中实际使用的辐射探测器并不是简单的原理性结构，常常具有复杂的结构。图 2-3 显示的是 CCD 或 CMOS 辐射探测器的结构，图 2-3a 是它的基本组成部分，图 2-3b 是线阵列探测器的实际结构。

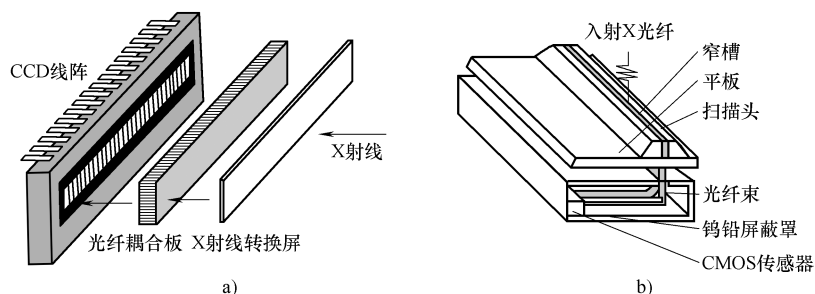


图 2-3 CCD 或 CMOS 辐射探测器的结构
a) 基本组成部分 b) 线阵列探测器的实际结构

2.1.2 辐射探测器主要性能

从制造角度，对于辐射探测器应考虑的性能主要包括：量子检出效率、灵敏度、动态范围（线性范围）、信噪比、时间分辨率、能量分辨率、空间分辨率等。

1) 量子检出效率（DQE）是探测器将输入辐射信号转换为输出信号的效率。输入信号强度与输出信号强度常用粒子数或光子数表示。量子检出效率与探测器种类、入射射线类型与能量等相关。它直接影响得到的图像质量。

2) 灵敏度指探测器输出可检测信号时所需要的最少输入信号强度。好的探测器灵敏度可达到一个光子。

3) 动态范围，即探测器输出信号与输入信号成正比的范围，也称为线性范围。

4) 信噪比即检测信号强度与噪声信号强度之比。噪声指由非输入信号造成的输出信号。

5) 时间分辨率是探测器可分辨的两个相邻入射粒子的最小时间间隔。

6) 能量分辨率是探测器分辨不同能量粒子的能力，通常以某一能量的输出脉冲的半高宽度除以脉冲高度表示。

7) 空间分辨率是探测器分辨最小几何细节的能力，常用（调制传递函数降为 0.2 的）空间频率或不清晰度表示。应注意，空间分辨率与采用的具体技术相关。

ASTM E2597-07 标准（数字探测器阵列制造性能）规定，评价数字探测器阵列制造性能应包括基本空间分辨率、效率、对比度灵敏度、特定材料厚度范围及有关图像的一些因素。按 ASTM E2597-07 标准的术语定义，“效率”为规格化信噪比（见下节）被射线剂量平方根（单位为 mGy）除的商，用于测量探测器对不同射线能量、不同线质的响应。

从使用角度，最关心的辐射探测器性能指标常为：像素尺寸、空间分辨率、动态范围、适用能量、使用寿命等。

部分辐射探测器的主要性能见表 2-1。关于空间分辨率应注意的是，表中给出

的空间分辨率是探测器可达到的最高空间分辨率。

表 2-1 部分辐射探测器的主要性能

辐射探测器	适用能量	典型像素尺寸/ μm	典型空间分辨率/(Lp/mm)	动态范围	使用寿命
非晶硅平板	可达 15MeV	127	≈ 4	$>2000:1$	10 年
CMOS 线阵	20 ~ 450kV	80	~ 6	$>2000:1$	10 年
IP 板	10kV ~ 32MeV	50 ~ 500	6 ~ 10	$10^4:1$ 以上	约 5000 次

注：IP 板激光扫描读出点的可用尺寸还有其他值，如 42 μm 、60 μm 、75 μm 、85 μm 、100 μm 、135 μm 等。

2.1.3 辐射探测器基本性能

从构成数字射线检测技术角度，表征辐射探测器的基本性能是基本空间分辨率（力）和规格化（标准化、归一化）信噪比。

1. 基本空间分辨率

空间分辨率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，可实现的空间分辨率可能不同。因此需要一个可表征其辐射探测器空间分辨率性能的特殊空间分辨率指标。

基本空间分辨率是表征探测器性能的基本指标之一（实际也是数字射线检测系统的基本性能），通常记为 SR_b 。基本空间分辨率定义为在规定的特定条件下（主要是透照的放大倍数为 1，特定射线能量、几何不清晰度的可忽略），采用双丝像质计测定的检测图像不清晰度的 1/2。若记检测图像测定的不清晰度为 U ，则

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

其也作为探测器的有效像素尺寸 P_e 。

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

基本空间分辨率决定了探测器在不采用放大技术下可分辨的最小几何细节间距。

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 ——探测器固有模糊度。

这样就有

$$U_D = 2SR_b$$
 (2-3)

即探测器基本空间分辨力实际是探测器固有模糊度的 1/2。

采用双丝像质计测定探测器基本空间分辨率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对检测信号响应的特性。按一般概念，它定义为采用探测器获得的图像信号平均值与图像信号统计标准差之比。记信噪比为 SNR ，信号平均值为 S ，信号统计标准差为 σ ，则信噪比为

$$SNR = \frac{S}{\sigma}$$

探测器获得图像的信噪比，决定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，在同样射线检测技术中，获得图像的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（归一化、标准化）信噪比概念。

规格化信噪比通常记为 SNR_N ，它是按探测器基本空间分辨率 SR_b 规格化的信噪比值。即将探测器给出的信噪比值转换为基本空间分辨率为 $88.6\mu\text{m}$ 下的信噪比

$$SNR_N = \frac{88.6}{SR_b} SNR \quad (2-4)$$

式中的 $88.6\mu\text{m}$ 引出，是以直径为 $100\mu\text{m}$ 的圆形单元（像素）为比较基准。由于探测器的单元（像素）通常都为正方形，直径为 $100\mu\text{m}$ 的圆形转换为正方形，则该正方形的边长应为 $88.6\mu\text{m}$ 。因此式（2-4）也就是将探测器的信噪比值，转换为边长为 $88.6\mu\text{m}$ 正方形的信噪比值，从而来比较不同探测器的信噪比特性。

表征探测器规格化信噪比特性，主要是用在一定射线能量下的规格化信噪比与剂量平方根关系曲线，如图 2-4 所示。图中，曲线的近似直线区范围、饱和值大小等，都与探测器的特性、结构密切相关，也与探测器的使用情况相关（对于 DDA 探测器，当进行了严格响应校正后，直线部分可延续到很大范围）。为比较不同探测器的规格化信噪比，测定方法应符合相关标准规定。

关于信噪比的进一步说明，可参阅第 3 章的相关内容。

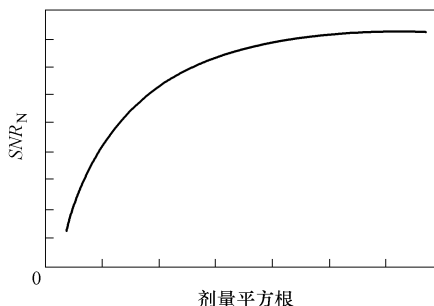


图 2-4 探测器规格化
信噪比与剂量平方根关系

2.2 直接数字化射线检测技术的辐射探测器

2.2.1 概述

直接数字化射线检测技术的辐射探测器主要是非晶硅辐射探测器、非晶硒辐射探测器和 CCD 或 CMOS 辐射探测器。这些探测器由一个个独立的探测单元（像素）构成，也常统称为“分立辐射探测器”，缩写用 DDA。它们完成对射线的探测与转换，同时完成图像数字化，直接获得数字检测图像。

由探测单元（像素）面阵列构成的探测器称为面阵探测器。常用的面阵探测器探测单元尺寸（像素尺寸）为 127 μm 、143 μm 、200 μm 等，其 A/D 转换位数一般都可达到 12bit、14bit 或 16bit。显然，更小的探测单元（像素）尺寸、更高的 A/D 转换位数可以构成性能更好的检测系统。

由探测单元（像素）线阵列构成的探测器称为线阵探测器。典型的探测单元尺寸（像素尺寸）有 84 μm 、127 μm 等，其 A/D 转换位数，一般都可达到 12bit、14bit 或 16bit。

对于直接数字化射线检测技术的辐射探测器，最关心的性能指标是探测单元尺寸（像素尺寸）、A/D 转换位数和适用能量范围。

2.2.2 非晶硅辐射探测器

非晶硅探测器是一种间接转换辐射探测器。
非晶硅辐射探测器由闪烁体、非晶硅层（光电二极管阵列，光电二极管是一类光探测器件，基本结构是 PN 结，光照时 PN 结产生的电子-空穴对形成光生电流，把光信号转变成电信号，实现对光信号的探测）、TFT 阵列（薄膜晶体管阵列，在非晶硅辐射探测器中，作为开关控制电信号传送）、读出电路构成。图 2-5 是平板非晶硅探测器的结构示意图。

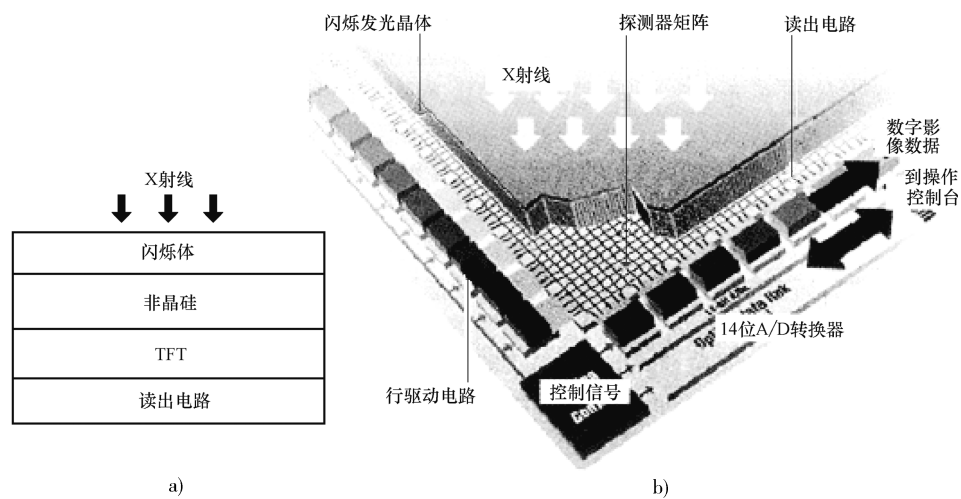


图 2-5 平板非晶硅探测器的结构示意图
a) 基本结构示意图 b) 内部结构示意图

非晶硅辐射探测器探测射线的过程：入射射线激发闪烁体层，闪烁体层将辐射转换为荧光；荧光传输到非晶硅二极管阵列，非晶硅将荧光转换为电信号；电信号被送到对应于非晶硅二极管阵列的 TFT，在 TFT 的各电容单元形成存储电荷；最后

由读出电路顺序读出，形成数字图像信号。其探测过程可概括如下：

入射射线→荧光→电信号→存储电荷→数字图像信号

每个 TFT 单元成为采集信息的最小单元，称为像素。

2.2.3 非晶硒辐射探测器

非晶硒探测器是一种直接转换的辐射探测器，其基本组成部分是非晶硒（作为光电材料）、薄膜晶体管阵列（TFT）、读出电路。图 2-6 是平板非晶硒探测器结构示意图。图 2-6b 是非晶硒探测器内部结构示意图。

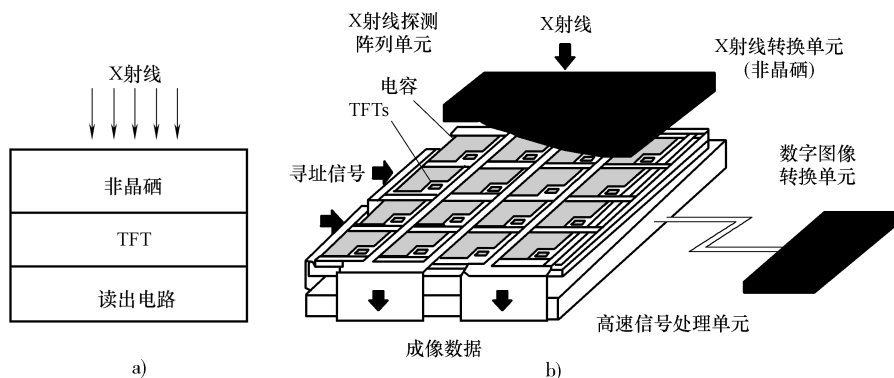


图 2-6 平板非晶硒探测器结构示意图

a) 基本结构示意图 b) 内部结构示意图

非晶硒辐射探测器用非晶硒作为光电转换材料，直接将辐射转换为电信号。产生的电荷存储到 TFT 的各个探测器单元（每个单元包括一个电容）。在读出电路控制下，储存的电荷被顺序读出，经处理、放大、A/D 转换等，形成数字图像信号。对非晶硒辐射探测器的探测过程进行概括，则有

入射射线→电信号→存储电荷→数字图像信号

2.2.4 CCD 或 CMOS 辐射探测器

CCD（电荷耦合器件）或 CMOS（互补金属氧化物半导体）辐射探测器的基本结构为三部分，第一部分为闪烁体，用于将辐射转换为光信号，第二部分为 CCD 或 CMOS 感光成像器件，将光信号转换为电信号。第三部分为后续电路，测量电信号，完成对辐射的探测。可见，实现辐射探测转换的是闪烁体，CCD 或 CMOS 实现的是对光信号的转换和探测。

CCD 是将可见光转换为数字信号的器件。CCD 的基本结构是密排的二极管阵列，在光照条件下，发生电子跃迁，形成电子-空穴对。在外电场作用下，电子和空穴分别向两极运动，形成电子电荷，即光生电荷。利用光生电荷（信息电荷），形成图像视频信号。

CMOS 在光电信号产生上与 CCD 相同，但在构造上和信号读取上不同于 CCD。基本的不同是，CMOS 的各像素单元本身具有放大功能电路，产生的信号电荷在经过放大后传输到输出电路，使信号在传输路径中不易受到噪声影响。

*** 2.2.5 分立辐射探测器（DDA）的响应校正和坏像素修正**

分立辐射探测器（DDA）是由多个探测单元矩阵构成的探测器。各个单元的本底噪声可能不同，不同单元对射线的响应特性可能不同。这导致在无射线信号时，由于各个单元的本底噪声不同，也会显示某个不均匀的图像。即使在同样的曝光量下，由于各个单元的增益不同，可以做出不同响应，给出不同检测信号，造成虚假检测图像。也就是，由于分立辐射探测器本身结构的不均匀特性，可以形成噪声信号，称为结构噪声。如果不校正这种结构不均匀性，DDA 探测器很难完成正确的检测。

由于 DDA 辐射探测器由分立探测单元构成的结构特点，对各个探测单元的差异可以进行严格、准确的测量，因此可以采用软件补偿各个单元的差异，使它们对同一检测信号做出同样的响应。这称为分立辐射探测器（DDA）响应校正。分立辐射探测器的响应校正，包括对探测器各单元本底噪声的偏置校正和对探测器各单元的增益校正。

偏置校正通过适当过程对获得的像素值减去一个特定的像素平均值，使得无射线信号时像素显示为 0 值。增益校正通过适当过程利用软件使探测器各个单元对射线信号以相同增益做出相同的响应。图 2-7 显示的是一个探测器的多点响应校正。图 2-7a 中，A 曲线是未校正时探测器单元输出信号，B 曲线是多点增益校正曲线，R 曲线是理想的增益校正后探测器单元输出信号，S 曲线是对 R 曲线又进行偏置校正后探测器单元理想的输出信号。图 2-7b 中，A 曲线是在某透照电压、曝光量下未进行响应校正时探测器各单元给出的响应（灰度值），B 曲线是进行响应校正后探测器各单元给出的响应（灰度值）。

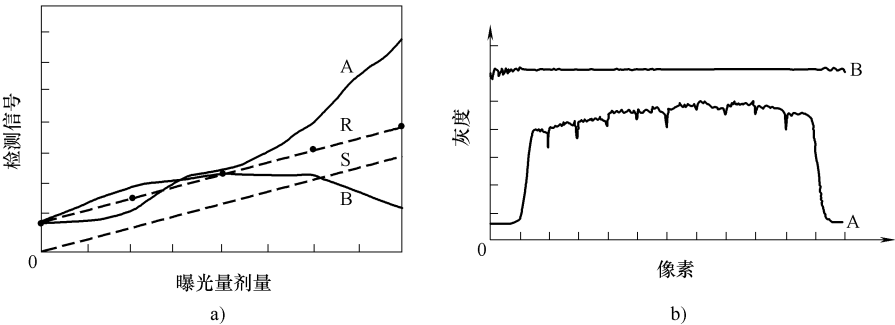


图 2-7 探测器的多点响应校正
a) 响应校正的基本方法 b) 响应校正的结果

通过分立辐射探测器响应校正，可以使探测器的信噪比与曝光剂量的平方根呈线性关系。经过严格、优良的响应校正后，分立辐射探测器可以在很大的曝光剂量范围内，获得信噪比与曝光剂量的平方根间的线性响应关系。图 2-8 显示了某个探测器经过严格、优良的响应校正后的规格化信噪比与曝光剂量的平方根间的线性响应关系。

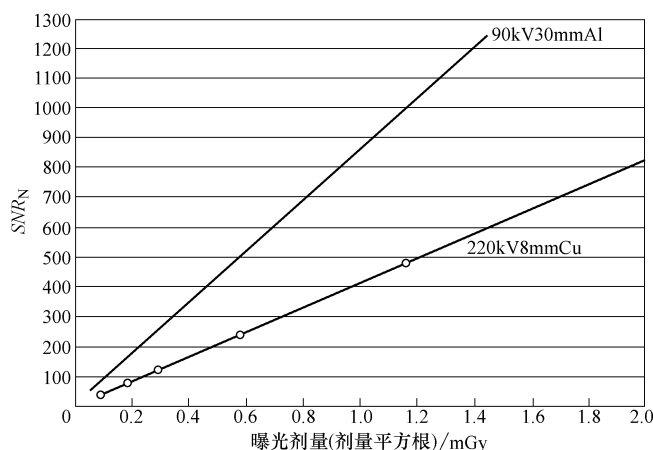


图 2-8 DDA 探测器的规格化信噪比与曝光剂量关系

对于分立辐射探测器（DDA），常定义规格化信噪比与剂量平方根间的线性关系曲线的斜率，也即曝光剂量平方根值为 1mGy 对应的规格化信噪比值为探测器效率。其用于测定探测器对不同射线能量（线质）的响应特性。

探测器制造厂提供的实际响应校正程序，主要分为单点增益偏置校正和多点增益偏置校正。单点增益偏置校正是采用探测器输出信号一个点的数据进行的响应校正，多点增益偏置校正是采用探测器输出信号多个点（常为 4 点）的数据进行的响应校正。图 2-9 显示的是实际探测器响应校正的信噪比与剂量关系。可见，不同的响应校正程序效果存在差别。探测器响应校正后的信噪比与剂量平方根间的（近似）线性关系，将限定在一定的剂量范围内。

响应校正是 DDA 探测器获得高信噪比的关键技术措施。

探测器响应校正（偏置校正和增益校正）应按探测器制造厂规定的方法和步骤进行。即，采用探测器制造厂提供的软件和规定的程序进行。一般说，一次校正可适用于某种材料一定能量范围内（某个厚度范围）的检测工作。

此外，使用分立辐射探测器（DDA）还应进行坏像素修正。探测器的坏像素是指性能超出规范要求的像素单元，显然它们不能正确地给出检测图像信号（可能给出伪信号）。为获得正确的检测结果，必须消除它们的影响，这就需要进行坏像素修正。在探测器中，原来就可能存在不符合探测器技术条件的坏像素单元

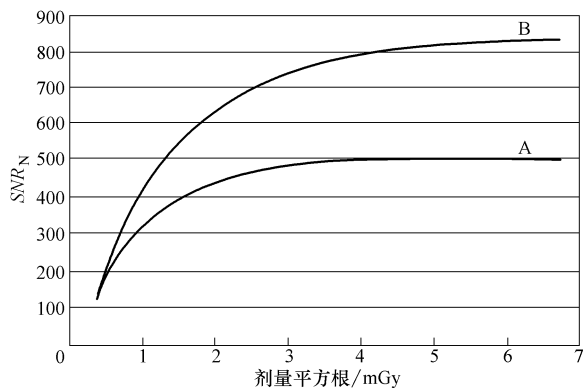


图 2-9 实际探测器响应校正的信噪比与剂量关系

A—单点增益偏置校正 B—多点增益偏置校正

(它们被限定在规定范围), 随着使用可能出现新的坏像素单元, 因此需要进行坏像素修正。

坏像素修正应采用探测器 (DDA) 制造厂提供的软件和规定的程序进行。

*** 2.2.6 分立辐射探测器 (DDA) 的性能特点**

1. 基本空间分辨率

分立辐射探测器的基本空间分辨率, 严格说应认为由其有效像素尺寸决定, 即

$$SR_b = P_e$$

但一般可认为有效像素尺寸与其像素尺寸 P 近似相等, 因此有

$$SR_b = P \tag{2-5}$$

这样, 探测器的固有不清晰度将简单地

$$U_D = 2P \tag{2-6}$$

2. 规格化信噪比

经过探测器响应校正后, DDA 探测器可获得很高的规格化信噪比。DDA 探测器在较小的曝光量下就可获得 500 以上的规格化信噪比 (但对胶片射线照相, 需要采用性能好的胶片在较大曝光量下才能获得 200 左右的规格化信噪比)。DDA 探测器获得的信噪比, 除与探测器本身特性相关外, 还与射线束谱 (能量)、射线剂量、滤波物体相关。

3. 光电转换特性

对于分立辐射探测器, 探测器工作设计在光电转换处于线性关系范围, 即探测器的输出信号与输入信号成正比。图 2-10 是部分实际探测器的光电转换特性。

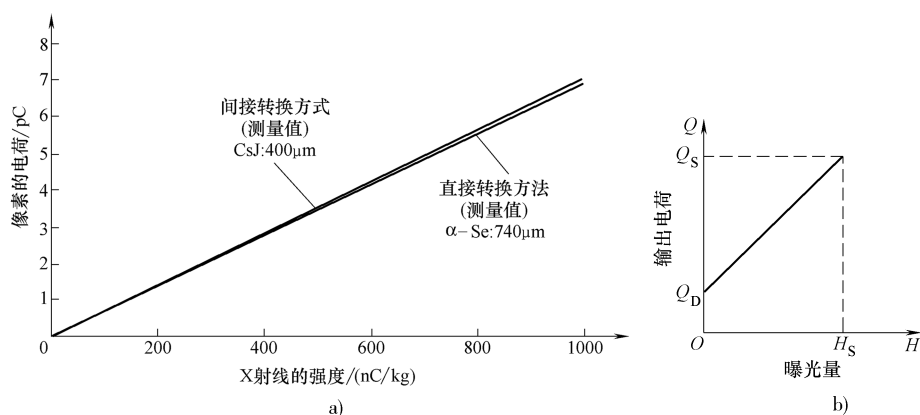


图 2-10 分立辐射探测器的光电转换特性

a) 非晶硅与非晶硒 b) CCD

2.3 间接数字化射线检测技术的辐射探测器

工业间接数字化射线检测技术系统的辐射探测器主要是 IP 板（成像板）和图像增强器，此外还有光电倍增管（器）等。由于检测图像需要经过后续单独的图像数字化单元完成图像数字化，在研究探测器对检测图像质量的影响时，必须同时考虑其对后续图像数字化单元的影响。因此对间接数字化射线检测技术引入了“探测器系统”概念。所谓探测器系统，是将探测器、后续图像数字化单元及后续图像数字化参数作为一个整体，讨论其性能。

2.3.1 成像板（IP 板）

成像板常简单称为 IP 板，它是 CR 技术这种间接数字化射线检测技术系统的辐射探测器。

1. IP 板简介

IP 板是一种储存荧光成像板，它是采用特殊荧光物质制作的辐射探测器。所采用的荧光物质受到射线照射时，在较高能带俘获的电子形成光激发射荧光中心 (PLC)，以潜在图像保留照射射线信息。采用激光激发时，光激发射荧光中心的电子将返回它们初始能级，并以发射可见光的形式输出能量。这种光发射与原来接收的射线剂量成比例。这样，当用激光束扫描储存荧光成像板时，就可将射线照相图像转化为可见的图像。

IP 板的基本结构如图 2-11a 所示，其主要由保护层、荧光层、支持层、背衬层构成。

保护层为非常薄的聚酯树脂类纤维，保护荧光层不受外界的影响。荧光层采用特殊的荧光物质，即光激发射荧光物质构成。荧光物质目前主要采用的是氟卤化钡

(二价铕激活)。氟卤化钡（二价铕激活）荧光物质的晶体结构如图 2-11b 所示。支持层常用聚酯树脂类纤维胶制作。它具有良好的力学强度，保护荧光层免受外力损伤。背衬层制成黑色，防止激光在荧光层和支持层的界面反射。

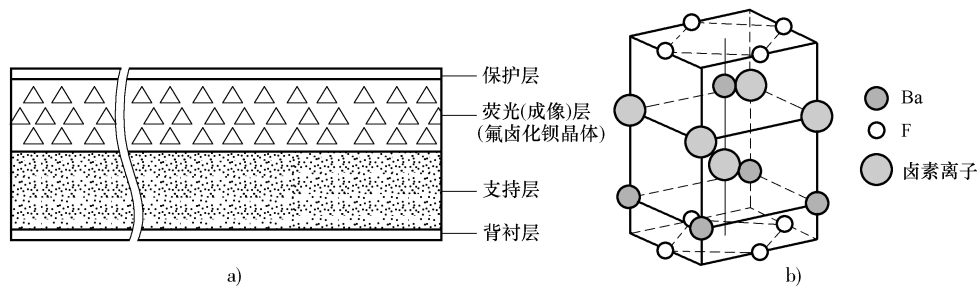


图 2-11 IP 板结构
a) IP 板的基本结构示意图 b) 氟卤化钡的晶体结构

在 IP 板上储存的潜在射线图像，可用激光束扫描读出，图像读出后，经过光照射，可擦除 IP 板上的潜在射线图像，IP 板可再次用于记录射线图像。

IP 板的主要特性参数有：分辨率、动态范围、谱特性（吸收谱、发射谱、激发谱）、时间响应特性、衰退特性。图 2-12 显示了 IP 板的主要特性。

IP 板的（空间）分辨率由荧光层的特性决定，与测定时的射线能量相关。荧光层的氟卤化钡晶体尺寸越大，分辨率越低，但光激发的光现象越强。IP 板的谱特性可以分为吸收谱特性、发射谱特性和激发谱特性。吸收谱特性给出的是采用不同能量射线照射时，IP 板吸收射线的情况。发射谱特性给出的是在射线照射时，IP 板吸收射线发射荧光的谱分布。激发谱特性给出的是 IP 板采用不同波长激光激发时，IP 板发射荧光的相对值。

IP 板的时间响应特性描述的是 IP 板受到 X 射线或激光激发时，产生的发射荧光强度随时间减弱的关系，如图 2-12b 所示。从图中可见，激发后经约 $0.8\mu\text{s}$ 的时间，发射强度即降到初始强度的 $1/e$ 。IP 板的衰退特性描述的是 IP 板受到 X 射线照射后，以准稳态储存的 X 射线能量（形成的潜在射线检测图像）随储存时间增加而减弱的情况，如图 2-12c 所示。

IP 板具有很宽的动态范围，其输出的荧光信号在相当大的射线照射剂量变化范围内，都显示为线性响应的特点，一般可达到 $10^4:1$ 以上。图 2-12d 显示了 IP 板的动态特性。

2. IP 板系统

IP 板系统，即 CR 技术的辐射探测器系统，是由 IP 板、IP 板信息扫描读出单元、扫描读出参数组成的整体。很多时候，所称的 CR 系统实际指的是 IP 板系统。

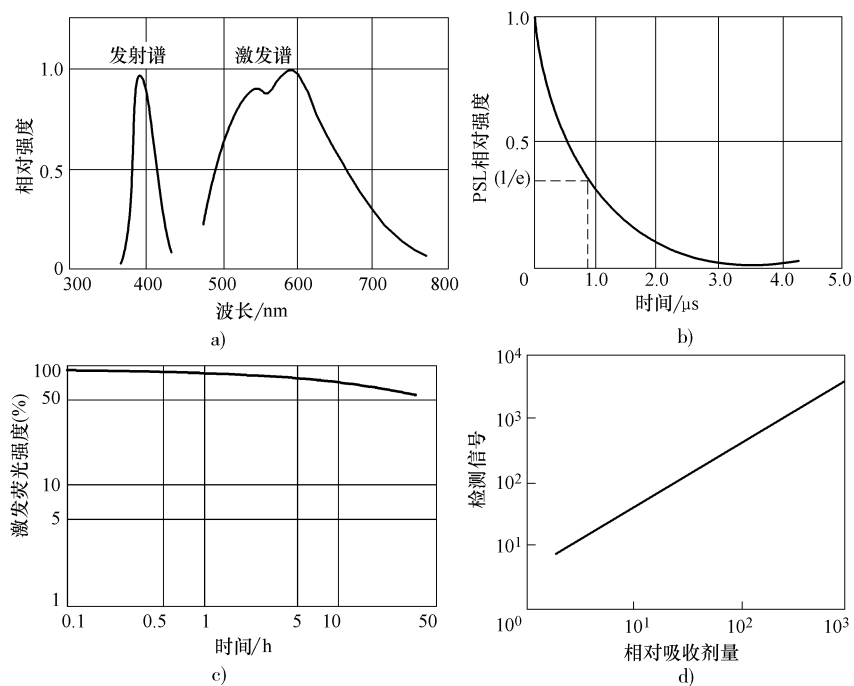


图 2-12 IP 板的主要特性

a) IP 板的谱特性 b) IP 板的时间响应特性 c) IP 板的衰退特性 d) IP 板的动态特性

3. IP 板分类

IP 板作为 CR 技术的辐射探测器，对 CR 系统性能以及获得的检测图像质量具有基本性影响。不同 IP 板的性能不同，正确选用 IP 板是构成符合检测要求 CR 系统的基本保证。在有关标准中对 IP 板进行了分类，分类指标是 IP 板与一定的 IP 板扫描读出单元、扫描读出参数结合成系统可达到的最低规格化信噪比值 SNR_N ，因此 IP 板分类实际是 IP 板系统分类。

不同标准做出了不同分类，表 2-2 列出的是欧洲标准和美国材料试验学会标准关于 IP 板的类别。表中出现的 IP 板类别的表示方式是：IPX/Y。其中，X 为类别代号：I、II、III、…（或 1、2、3、…），Y 为 IP 板系统的基本空间分辨率，以微米（μm）为单位表示。

表 2-2 IP 板的分类

EN 14784-1; 2005	ASTM E2446-05	最低规格化信噪比值 SNR_N
IP1/Y	IP-特级/Y	130
IP2/Y	—	117
IP3/Y	—	78
IP4/Y	IP-I/Y	65
IP5/Y	IP-II/Y	52
IP6/Y	IP-III/Y	43

例如，IPⅡ/100，表示 ASTM 标准的Ⅱ类 IP 板（系统），该 IP 板系统的最低规格化信噪比不小于 52，系统的基本空间分辨率为 $100\mu\text{m}$ 。IP3/140，表示欧洲标准的 3 类 IP 板（系统），该 IP 板系统的最低规格化信噪比不小于 78，系统的基本空间分辨率为 $140\mu\text{m}$ 。

需要注意的是，由于 IP 板系统的分类，相关于 IP 板的性能，也相关于扫描读出单元和扫描参数，因此 IP 板本身性能并不能完全决定其类别。性能好的 IP 板在不同条件下可以显示为不同类别的 IP 板，但性能差的 IP 板不能显示为更好类别的 IP 板。

2.3.2 图像增强器

图像增强器是一种实时成像的间接数字化射线检测系统的辐射探测器。

1. 图像增强器的基本结构

图像增强器的基本结构包括外壳、射线窗口、输入屏、聚焦电极、输出屏。图 2-13 是图像增强器主要结构示意图。

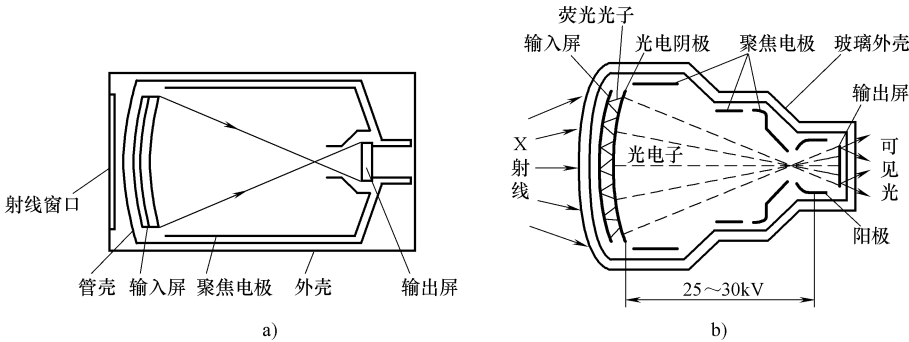


图 2-13 图像增强器主要结构示意图

窗口由铝板或钛板制作，铝板的厚度一般为 $0.7 \sim 1.2\text{mm}$ 。既具有一定的强度，又可以减少对射线的吸收。输入屏主要由基板、闪烁体（荧光体）和光电（阴极）层构成。输入屏基板为铝板，厚度一般约为 0.5mm 。闪烁体主要采用 CsI 晶体制作，其主要特性见表 2-3，其中铯（Tl）为激活剂。CsI 晶体具有类似光纤的针状结构，它可以限制光的漫散射。光电层是一种基于外光电效应的光电发射材料。聚焦电极加有 $25 \sim 30\text{kV}$ 的高压。输出屏为一荧光屏，直径一般在 $15 \sim 35\text{mm}$ 之间，发射光的峰值波长为 $520 \sim 540\text{nm}$ 。

2. 图像增强器工作基本过程

图像增强器工作的基本过程：射线透过工件，穿过图像增强器的窗口入射到输入转换屏上，输入转换屏闪烁体（CsI）吸收射线的部分能量，将其能量转换为荧光发射。发射的荧光被光电（阴极）层接收，并将荧光能量转换为电子发射。发射的电子在聚

焦电极的高压作用下被加速和聚焦，高速撞击到输出屏上。输出屏荧光物质将电子能量转换为荧光发射，形成检测图像。在图像增强器中完成的转换过程可概括为：

射线→可见光（荧光）→电子→可见光（荧光）

一方面光电（阴极）层的灵敏度会随使用时间增加而降低，另一方面，由于增强管内真空度随着时间的降低，也将影响光电（阴极）层的灵敏度，因此无论使用与否，光电（阴极）层的灵敏度都会随着时间的增加而降低，从而限制了图像增强器的寿命。

表 2-3 碘化铯闪烁晶体的主要特性

名称	分子式	密度/ (g/cm ³)	最大发射 波长/nm	转换效率 ^① (%)	衰减常数 ^② μs	3ms 余辉 (%)
碘化铯	CsI (TI)	4.51	420 ~ 570	45	1.0	0.5 ~ 5

①以碘化钠转换 X 射线的效率为 100%（约为 15%）。

②信号衰减到最大强度的 37% 所需要的时间。

3. 图像增强器系统

图像增强器输出屏上的图像，采用与其耦合的光学系统和摄像系统拾取，然后经 A/D 转换获得数字检测图像，因此对于图像增强器检测技术系统，其探测器系统应包括图像增强器、图像增强器后接的可见光图像拾取单元（光学系统与 CCD 单元等）、A/D 转换器。它们共同决定了探测器系统的性能，其中图像增强器的输入屏是直接探测和转换射线信号的部分，可认为是探测器系统的基本部分。也就是，图像增强器输入屏本身的性能对探测器系统性能起着基本影响作用。

* 2.3.3 IP 板系统性能特点

对于间接数字化射线检测技术，由于存在后续数字化过程，在讨论探测器性能时，特别是讨论探测器基本性能时，必须引用探测器系统概念。

在引用了探测器系统概念后，可对探测器系统给出基本空间分辨率和规格化信噪比

$$SR_b = \frac{1}{2}U, SR_b = P_e, U_D = 2SR_b$$

可见，这时与分立辐射探测器具有相同的表示式，只是要记住它是对探测器系统给出的结果。

图 2-14 显示的是 IP 板系统的规格化（归一化、标准化）信噪比与

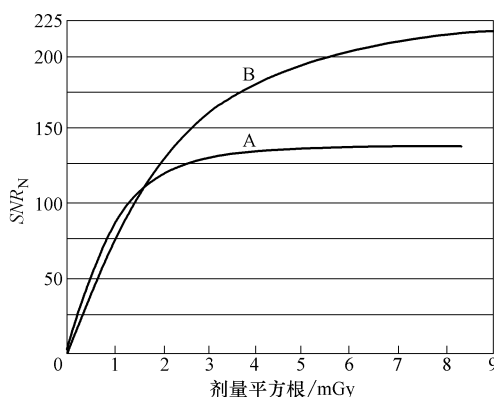


图 2-14 IP 板系统的规格化信噪比与曝光剂量关系

A—一般分辨率 IP 板 B—高分辨率 IP 板

曝光剂量的一般关系。从图中可见，在最初信噪比随曝光剂量增大而增大，当曝光剂量增大到一定程度后，信噪比不再随曝光量的增加有明显提高。规格化信噪比与曝光剂量的上述关系显示的是，当曝光剂量增大到一定程度后，IP 板系统的结构噪声将限制信噪比的提高。

研究指出，IP 板系统的规格化信噪比与图像灰度间存在对应关系。在 ISO 17636-2: 2013 标准的附录中给出了图 2-15 所示关系。研究也指出，这种对应关系与射线能量无关，包括对 X 射线、 γ 射线，X 射线能量可从 50kV 到数兆伏。与射线胶片比较，在小曝光剂量区，IP 板系统的规格化信噪比大于射线胶片，当曝光剂量较大时（如曝光剂量超过 16mGy），一般 IP 板的规格化信噪比将小于射线胶片的规格化信噪比。

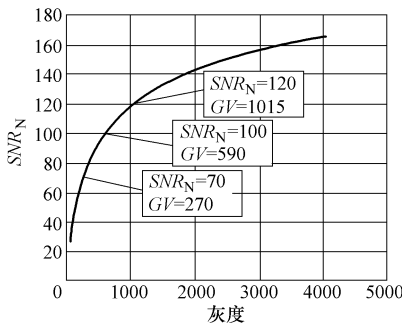


图 2-15 IP 板系统的规格化信噪比与图像灰度

2.4 A/D 转换器

A/D 转换（模/数转换）器是将模拟信号转换为数字信号的器件。信号可以分为模拟信号、脉冲信号、数字信号。在时间上和幅值上连续变化的信号是模拟信号，在时间上和幅值上不连续变化的信号是脉冲信号，数字信号是由二进制数字 0、1 组成的信号。图 2-16 显示了三种信号的对应关系。

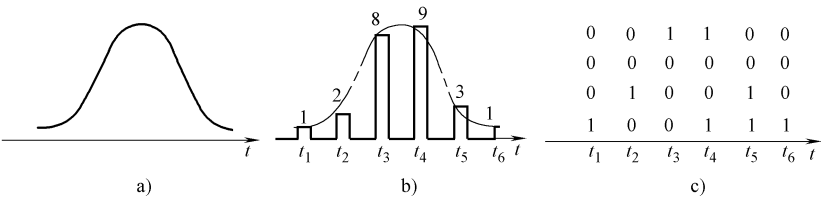


图 2-16 模拟信号、脉冲信号与数字信号的对应关系
a) 模拟信号 b) 脉冲信号 c) 数字信号

通过 A/D 转换（模/数转换）可将模拟信号转换为数字信号（将模拟量转换为数字量）。A/D 转换过程包括取样、保持、量化、编码四个步骤，图 2-17 显示了在 A/D 转换器（模/数转换器）完成 A/D 转换的基本过程。

由于模拟信号是随时间连续变化的量，因此在进行 A/D 转换时，需要对模拟信号周期性地连续取样，在取样后到下一次取样前的时间内需保持取样值不变，在 A/D 转换器内将其量化，编码成为数字信号。取样后保持中的信号值仍是连续的

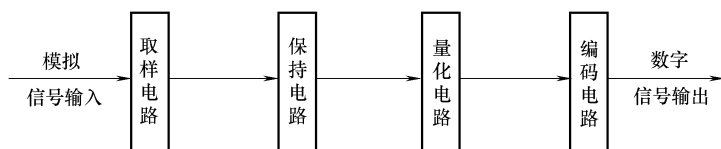


图 2-17 A/D 转换的基本过程

模拟信号值，为了用数字量表示，需将其转化成某个数量单位的整数倍，这个过程就是量化。

量化的最后过程是编码。由于在计算机中使用的是二进制数（以适应计算机基本器件的基本状态：开、关），因此必须将使用的十进制数转换为二进制数，编码就是采用一定方式的二进制数表示量化后数字（十进制数）的过程。一种常用的编码是二进制编码，它是用四位二进制数表示一位十进制数（称为 BCD 码），它的编码与十进制数存在简单对应关系。按照该编码，很容易将一个十进制数转换为 BCD 编码。例如，一个十进制数为 968，则其编码为 $(1001\ 0110\ 1000)_{\text{BCD}}$ 。这样，通过编码就将十进制数转换为计算机可识别、可运算的二进制数。实际上，在计算机中的字母和符号也都是采用特定规则用二进制数表示。

A/D 转换可分为不同方法，A/D 转换器可分为不同类型。类型不同结构组成不同、工作原理不同。

A/D 转换器的主要性能指标包括：分辨率、量化误差、输入模拟电压范围、转换速度、工作温度系数等。

1) 分辨率表示的是 A/D 转换器能够区分的最小输入模拟电压。因此它限制了 A/D 转换器分解输入模拟电压的能力。它由 A/D 转换器输入的模拟电压满量程值和可转换为二进制数的位数（比特，bit）决定。例如，A/D 转换器输入的模拟电压满量程值为 5V，当其输出二进制数的位数为 8 位（8bit）时，其可分辨的最小输入模拟电压为

$$5 \times 1000 \div 2^8 \text{ mV} = 19.53 \text{ mV}$$

如果其输出二进制数的位数为 12 位（12bit）时，其可分辨的最小输入模拟电压为

$$5 \times 1000 \div 2^{12} \text{ mV} = 1.22 \text{ mV}$$

2) 量化误差是 A/D 转换器对连续的输入模拟电压用有限的数字进行离散赋值时出现的误差。它是 A/D 转换过程固有的误差。显然，转换的二进制数的位数越高，量化误差会越小。

3) 输入模拟电压范围是 A/D 转换器可以正常工作的范围。

4) 转换速度用 A/D 转换器完成一次 A/D 转换的时间表示。

5) 温度系数是 A/D 转换器正常工作条件下，温度每改变 1℃ 导致的输出相对变化。

2.5 射线检测的像质计与线对卡

2.5.1 像质计概述

像质计（像质指示器，透度计）是测定射线检测图像质量的器件。像质计与工件同时透照，依据在检测图像上显示的像质计的细节影像，判定检测图像的质量。从而，进一步评定射线检测技术及其缺陷检验能力等。

在工业射线检测技术中，目前最广泛使用的像质计主要是：线型像质计、阶梯孔型像质计、平板孔型像质计和双丝型像质计。前面三种用于测定检测图像的射线检测灵敏度，主要是测定检测图像的厚度（或密度）对比度，一般称为常规像质计。双丝型像质计用于测定检测图像的清晰度（空间分辨率），是一种特殊类型的像质计。

像质计的核心结构是设计的特定细节形式，如丝、孔、槽等。制作常规像质计（线型像质计、阶梯孔型像质计、平板孔型像质计）的材料，应与被检验工件相同或相似，即对射线吸收具有相同或相似的性能。制作双丝型像质计应采用规定的、具有高吸收的材料。像质计的特定细节尺寸有严格限定要求。

2.5.2 常规像质计

下面简要介绍常用的常规像质计。

1. 线型像质计

线型像质计是国内外使用最多的像质计。它结构简单、易于制作，已被世界各国广泛采用，国际标准化组织也将线型像质计纳入其制定的标准中。线型像质计的形式、规格已基本统一。线型像质计主要应用在金属材料。

线型像质计的基本样式如图 2-18 所示。它的细节形式是丝，基本结构是平行排列的金属丝封装在对射线吸收系数很低的透明材料中。每个像质计中封装 7 根金属丝，金属丝的材料应与被透照工件材料相同或相近，金属丝的直径和长度应符合规定要求。丝的直径，多数国家采用的都是公比为 $\sqrt[10]{10}$ （近似为 1.25）的等比数列决定的一个优选数列。表 2-4 是线型像质计关于金属丝的基本规定。

多数国家标准关于线型像质计的基本设计是：基本材料为钢（Fe）、铜（Cu）、钛（Ti）、铝（Al）。线型像质计分为四组：

- 1) W1：由 1 ~ 7 号丝构成；
- 2) W6：由 6 ~ 12 号丝构成；
- 3) W10：由 10 ~ 16 号丝构成；

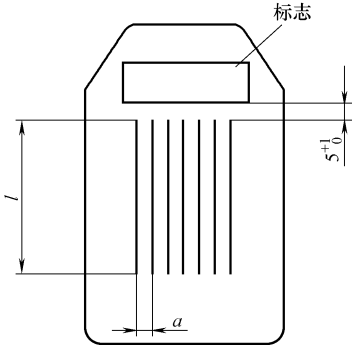


图 2-18 线型像质计的基本样式

4) W13：由 13 ~ 19 号丝构成。

表 2-4 线型像质计关于金属丝的基本规定 (单位：mm)

像质计组成				金属丝要求			
W1	W6	W10	W13	线号	公称直径	直径极限偏差	丝中心间距
○	—	—	—	W1	3. 20	±0. 03	9. 6 ⁺¹ ₀
○	—	—	—	W2	2. 50		7. 5 ⁺¹ ₀
○	—	—	—	W3	2. 00		6 ⁺¹ ₀
○	—	—	—	W4	1. 60	±0. 02	5 ⁺¹ ₀
○	—	—	—	W5	1. 25		
○	○	—	—	W6	1. 00		
○	○	—	—	W7	0. 80		
—	○	—	—	W8	0. 63		
—	○	—	—	W9	0. 50	±0. 01	
—	○	○	—	W10	0. 40		
—	○	○	—	W11	0. 32		
—	○	○	—	W12	0. 25		
—	—	○	○	W13	0. 20		
—	—	○	○	W14	0. 16		
—	—	○	○	W15	0. 125	±0. 005	
—	—	○	○	W16	0. 100		
—	—	—	○	W17	0. 080		
—	—	—	○	W18	0. 063		
—	—	—	○	W19	0. 050		

在像质计的上方配备一定的标志。标志由数字和说明字母组成。数字为该像质计 7 根金属丝中直径最大丝的编号，说明字母给出金属丝的材料和像质计的标准代号。例如，标志为“10FEJB”表示的是：

- 1) 线型像质计的材料为钢（Fe）；
- 2) 该线型像质计中封装的是编号为 10 ~ 16 号的金属丝；
- 3) 最粗金属丝的编号为 10（直径为 0. 40mm）；
- 4) JB 是我国机械行业标准的线型像质计。

线型像质计以可识别的直径最小的丝判定达到的灵敏度值，或称为像质值（图像质量值）。

应注意的是，美国材料试验学会标准（ASTM E747）关于线型像质计的结构、材料分组给出了不同的设计。

2. 阶梯孔型像质计

阶梯孔型像质计的基本结构是在阶梯块上钻上直径等于阶梯厚度的通孔，孔应垂直于阶梯表面、不做倒角。典型的设计如图 2-19 所示。为了克服小孔识别的不确定性，常在薄的阶梯上钻上两个孔。

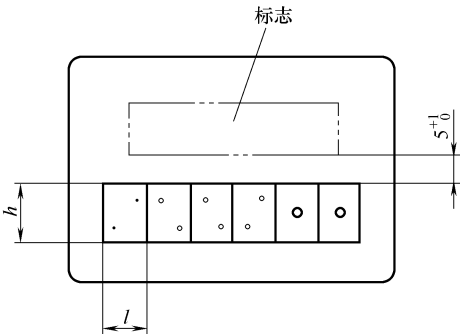


图 2-19 阶梯孔型像质计设计样式

与线型像质计一样，阶梯孔型像质计的材料应与被检工件的材料相同或相近。关于阶梯厚度、宽度、孔径等尺寸，欧洲有关标准的规定见表 2-5 和表 2-6。目前阶梯孔型像质计也分为四组，即 H1、H5、H9、H13，各组的组成见表 2-5。

表 2-5 阶梯孔型像质计的孔径和阶梯厚度要求 （单位：mm）

像质计组成				孔径和阶梯厚度要求		
H1	H5	H9	H13	孔号	公称孔径和阶梯厚度	极限偏差
○	—	—	—	H1	0.125	+0.015 0
○	—	—	—	H2	0.160	
○	—	—	—	H3	0.200	
○	—	—	—	H4	0.250	
○	○	—	—	H5	0.320	
○	○	—	—	H6	0.400	
—	○	—	—	H7	0.500	
—	○	—	—	H8	0.630	+0.020 0
—	○	○	—	H9	0.800	
—	○	○	—	H10	1.000	
—	—	○	—	H11	1.250	+0.025 0
—	—	○	—	H12	1.600	
—	—	○	○	H13	2.000	
—	—	○	○	H14	2.500	
—	—	—	○	H15	3.200	+0.030 0
—	—	—	○	H16	4.000	
—	—	—	○	H17	5.000	
—	—	—	○	H18	6.300	+0.036 0

表 2-6 阶梯孔型像质计的阶梯宽度规定

像质计编号	H1	H5	H9	H13
阶梯宽度 h/mm	10	10	10	15
各阶梯宽度 l/mm	5	7	7	15

阶梯孔型像质计以可识别的直径最小的孔判定达到的灵敏度值，或称为像质值（图像质量值）。

3. 平板孔型像质计

在美国广泛使用一种特殊形式的像质计（也称为透度计），这就是平板孔型像质计。可以认为它是一种特殊的阶梯孔型像质计。

平板孔型像质计是在均匀厚度的平板上钻上三个通孔，如果记板的厚度为 T ，则三个孔的直径分别为 $1T$ 、 $2T$ 、 $4T$ ， $1T$ 孔位于中间。板厚应选为透照厚度的 1%、2% 或 4%，板的材料应与被透照工件的材料相同或相近。平板孔型像质计的典型样式如图 2-20 所示。图中矩形设计适于较小透照厚度，圆形设计适于较大透照厚度。图 2-21 是部分平板孔型像质计的实物图。

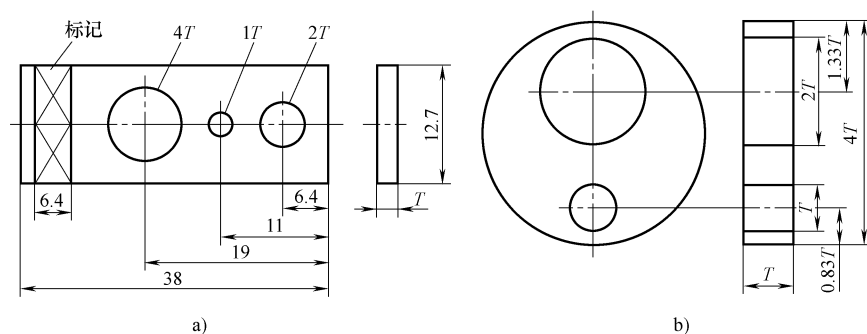


图 2-20 平板孔型像质计的典型样式

a) 矩形设计 b) 圆形设计

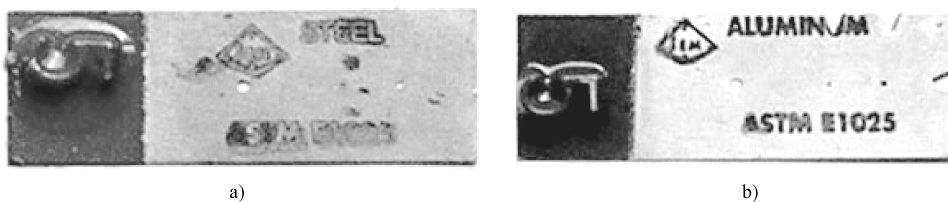


图 2-21 部分平板孔型像质计的实物图

a) 钢 (ASTM E1025) b) 铝 (ASTM E1025)

对于小厚度范围，像质计标准中规定，对于编号不大于 10 的平板孔型像质计

(即厚度不大于 0.254mm 的平板孔型像质计), 无论平板孔型像质计的板厚为多少, 像质计上面的孔直径一律为:

- 1) 1T 孔直径为 0.254mm (0.010in);
- 2) 2T 孔直径为 0.508mm (0.020in);
- 3) 4T 孔直径为 1.016mm (0.040in)。

即, 对于小厚度的平板孔型像质计, 其孔直径不遵守一般的设计要求。

对于平板孔型像质计, 以 $n_1 - n_2 T$ 方式规定灵敏度级别, 其中 n_1 是以透照物体厚度的百分数表示的像质计板厚, n_2 是应识别的最小孔径为像质计板厚 T 的倍数。一般说 (不考虑很小厚度情况), 对于平板孔型像质计, n_1 、 n_2 都只取 1、2 或 4。

对于平板孔型像质计, 还定义了一个特殊的射线照相灵敏度, 即等价像质计灵敏度, 一般简称为 EPS 灵敏度。该灵敏度的定义是: 在与 “ $n_1 - n_2 T$ ” 质量级别相同的透照技术下, 平板孔型像质计的板厚与透照工件厚度的百分比, 该平板孔型像质计的可识别的最小孔为 2T 孔。按 EPS 灵敏度定义, 对任意 “ $n_1 - n_2 T$ ” 灵敏度级别, 则应有

$$EPS = \frac{100}{x} \sqrt{\frac{TH}{2}} \quad (2-7)$$

式中 T ——平板孔型像质计板厚 (mm);

H ——识别的平板孔型像质计上的孔径 (mm)。

部分灵敏度级别的等价像质计灵敏度值如表 2-7 所示。

表 2-7 部分灵敏度级别的等价像质计灵敏度值

灵敏度级别	1-1T	1-2T	1-4T	2-1T	2-2T	2-4T
EPS 灵敏度 (%)	0.7	1.0	1.4	1.4	2.0	2.8

2.5.3 双丝型像质计

双丝型像质计是一种特殊的像质计, 它只用于测定射线检测的不清晰度 (也就是测定检测图像的空间分辨率)。

1. 双丝型像质计的样式和结构

双丝型像质计的样式如图 2-22 所示。图 2-23 是双丝型像质计的实物图片, 它的基本结构是以一定间距平行放置的一系列丝对。像质计中的丝对由直径相等、丝的间距等于丝的直径的两根丝组成。这样的一系列不同直径的丝对, 按一定间距封装起来, 并加上适当的标记构成了双丝型像质计。丝的材料应是铂、钨等对射线具有高吸收特性的物质, 丝径的值和允许的偏差都有严格的规定。表 2-8 列出的是有关标准关于双丝型像质计的尺寸和对应的不清晰度值的规定。

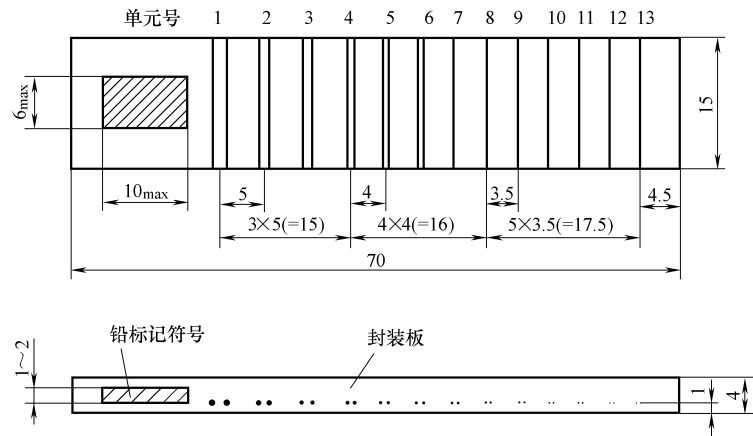


图 2-22 双丝型像质计的样式（圆形断面）

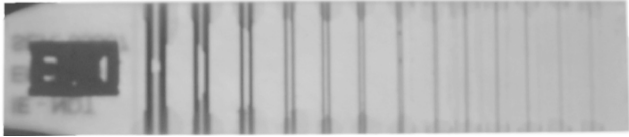


图 2-23 双丝型像质计的实物图片

表 2-8 双丝型像质计的不清晰度（单位：mm）

单元号	13	12	11	10	9	8	7
丝的材料	铂	铂	铂	铂	铂	铂	铂
丝径和间距	0.05	0.063	0.08	0.10	0.13	0.16	0.20
对应的不清晰度	0.10	0.13	0.16	0.20	0.26	0.32	0.40
单元号	6	5	4	3	2	1	
丝的材料	铂	铂	铂	钨	钨	钨	
丝径和间距	0.25	0.32	0.40	0.50	0.63	0.80	
对应的不清晰度	0.50	0.64	0.80	1.00	1.26	1.60	

注：在不同的标准中，关于丝径、间距、对应的不清晰度的值等规定与表中相同，但对单元号的规定可能不同。

2. 双丝型像质计的使用

采用双丝型像质计测定射线检测的不清晰度时，双丝型像质计应按采用的透照布置放置在被检验工件源侧表面或探测器侧表面，与工件同时透照。由于在不同方向不清晰度可能不同（特别是数字射线检测技术中），因此应考虑双丝型像质计的放置方向。

采用双丝型像质计测定射线检测的不清晰度时规定：采用目视直接观察时，以不能区分成丝对的各对丝中直径最大的组判定不清晰度（准确的测定，应从调制

传递函数确定)。这时有

$$U = 2d \tag{2-8}$$

式中 d ——该丝对中丝的直径。

从不清晰度值可按下面关系给出对应的空间频率值（单位为“线对/毫米”，记作“ L_p/mm ”）：

$$R = \frac{1}{2d} \tag{2-9}$$

即，测定的线对值 R 与测定的不清晰度值 U （单位用 mm）的关系如下：

$$R = \frac{1}{U} \tag{2-10}$$

比较准确时，以获得的双丝像质计灰度轮廓图确定。这时，通过软件可得到如图 2-24 所示的双丝型像质计灰度轮廓图，从图中找到第一个双丝轮廓中间幅度降低不超过 20% 的丝对，按它同上确定射线检测的不清晰度（准确时以双丝轮廓中间幅度降低恰为 20% 的丝对确定）。例如，图 2-24 中为 D8（见右图）。不同标准规定了更准确的确定不清晰度的方法。

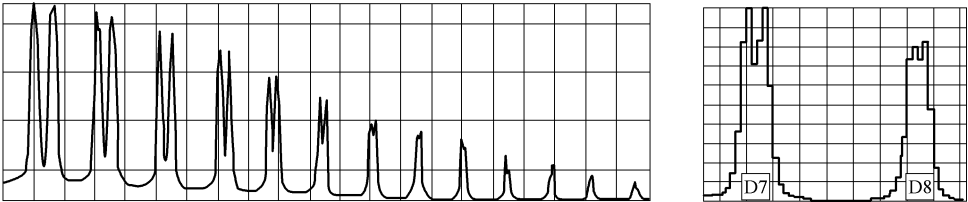


图 2-24 双丝型像质计灰度轮廓图

使用中应注意的是，目前设计的双丝型像质计只适用于 X 射线管电压不高于 400kV 检测情况的测定（ASTM E2007 标准认为，满意结果只能是不超过 250kV），这主要是因为吸收对比度的降低将影响给出判据的准确性。

2.5.4 线对卡

在数字射线检测技术中，空间分辨率也可采用线对（测试）卡测定，但其适用的仅是测定检测系统的空间分辨率。也就是，仅适用于不存在被检测工件时的空间分辨率测定。

线对卡的基本结构为两部分，高密度材料制作的栅条和低密度材料的（支持）底板。高密度材料常用铝箔，底板常用透明塑料薄板。栅条和间距的占空比为 1:1，栅条密封在底板上。底板厚度约 1mm，铝箔厚度常为 0.05mm。

线对卡的两种典型样式如图 2-25 所示。图 2-25a 为楔形线对卡，其栅条和间距

的宽度由宽到窄变化，但各处的占空比总是 1:1，其测定值的误差比矩形线对卡大些。图 2-25b 是矩形线对卡，其由一组组不同宽度（占空比总是为 1:1）的栅条和间距的线对构成。我国标准 GB/T 23903—2009 规定了类似的这样两种样式线对卡。

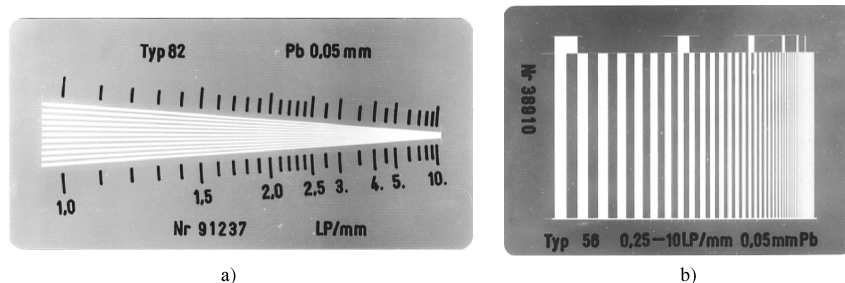


图 2-25 线对卡的两种典型样式

a) 楔形线对卡 b) 矩形线对卡

采用线对卡测定时，以刚刚不能区分线条和空处的线对值确定空间分辨率的值。对于楔形线对卡，可直接读出分辨率的值，使用方便，但测定值不精确。对于矩形线对卡，应按线对上方的方块标记，数出刚刚不能区分线对的顺序位置，然后查表 2-9 得到相应的分辨率的值，测定值比较精确。我国标准 GB/T 23903—2009 规定的矩形线对卡可直接读出线对值，但仅有 15 个线对值（单位为 L_p/mm ）：2.0, 2.24, 2.5, 2.8, 3.15, 3.55, 4.0, 4.5, 5.0, 5.6, 6.3, 7.1, 8.0, 9.0, 10.0。从得到的空间分辨率的值，则可按

$$U = \frac{1}{R}$$

给出对应的不清晰度值。

表 2-9 矩形线对卡的分辨率的值（单位： L_p/mm ）

标记号 ^①	标记线对的分辨率的值	后续线对的分辨率的值
1	0.25	0.275, 0.30, 0.33, 0.36, 0.40, 0.44
2	0.48	0.52, 0.57, 0.63, 0.69, 0.76, 0.83, 0.91
3	1.0	1.1, 1.2, 1.3, 1.45, 1.6, 1.75, 1.9
4	2.1	2.3, 2.5, 2.75, 3.0, 3.3, 3.6
5	4.0	4.4, 4.8, 5.2, 5.7, 6.3, 6.9, 7.6, 8.3, 9.1
6	10.0	9.1, 8.3, 7.6, 6.9, 6.3, 5.7, 5.2

① 标记为线对测试卡中线对上方的方块，标记号按图中从左→右顺序为 1、2、…6。

复习参考题

一、选择题（每题的四个选项中只有一个正确答案，请将正确答案的序号填在题末括号内）

1. 关于辐射探测器的主要性能，下面列出的项目中，错误的是（ ）。
A. 空间分辨率 B. 动态范围 C. 信噪比 D. 尺寸与重量
2. 关于辐射探测器的基本性能，下面列出的项目中，正确的是（ ）。
A. 基本空间分辨率与规格化信噪比 B. 基本空间分辨率与动态范围
C. 规格化信噪比与灵敏度 D. 规格化信噪比与线性范围
3. 对于工业数字射线检测技术，下面列出的常用辐射探测器中，错误的是（ ）。
A. 非晶硅探测器 B. 图像增强器
C. 成像板（IP板） D. 气体探测器
4. 关于非晶硅辐射探测器，下面给出的叙述中，存在错误的是（ ）。
A. 它是一种直接转换的辐射探测器
B. 结构包括闪烁体、非晶硅层和 TFT 阵列
C. 闪烁体将辐射转换为光
D. 非晶硅层将光转换为电信号
5. 对于 IP 板辐射探测器系统，下面列出的组成项目中，错误的是（ ）。
A. IP 板 B. IP 板扫描读出装置
C. A/D 转换器 D. 扫描读出软件
6. 对于图像增强器，下面列出的完成吸收射线、将射线转换为荧光过程的结构部位中，正确的是（ ）。
A. 输入屏 B. 闪烁体
C. 光电（阴极）层 D. 输出屏
7. 对于非晶硅辐射探测器，下面给出的决定其基本空间分辨率大小因素中，正确的是（ ）。
A. 像素尺寸 B. 检测布置放大倍数
C. 采用射线能量 D. 试件材料
8. 对于非晶硅辐射探测器，下面给出的关于规格化信噪比叙述中，正确的是（ ）。
A. 按基本空间分辨率决定的信噪比 B. 按射线能量决定的信噪比
C. 按放大倍数决定的信噪比 D. 探测器可获得的最高信噪比
9. 对于非晶硅辐射探测器，下面给出的影响其获得信噪比大小的因素中，错

误的是 ()。

- A. 探测器本身的结构均匀性
- B. 探测器面积大小
- C. 探测器像素尺寸大小
- D. 探测器的响应校正

10. 对于 IP 板辐射探测器系统, 下面列出的影响其基本空间分辨率的项目中, 错误的是 ()。

- A. IP 板本身
- B. 被检验试件材料
- C. IP 板扫描读出装置性能
- D. 扫描读出软件与设置参数

11. 对于编号标志为 “10FEJB” 的线型像质计, 下列叙述中, 错误的是 ()。

- A. 线型像质计的材料为钢 (FE)
- B. 最细金属丝的编号为 10 (直径为 0.40mm)
- C. 是我国机械行业标准的线型像质计
- D. 线型像质计金属丝直径公比近似为 1.25

12. 采用双丝像质计测量检测图像时, 若刚刚不能分辨为丝对的丝直径为 0.20mm, 下面给出的检测图像空间分辨率线对值中, 正确的是 ()。

- A. 5Lp/mm
- B. 4Lp/mm
- C. 3Lp/mm
- D. 2.5Lp/mm

二、判断题 (正确的画√, 错误的画×)

1. 辐射探测器, 按原理可分为三类: 气体辐射探测器、闪烁辐射探测器、半导体辐射探测器。 ()

2. 在气体辐射探测器内, 辐射能量可使气体电离, 通过测量电离产生的离子对实现对辐射的测量。 ()

3. 闪烁现象是指高能粒子照射物质时引起瞬时闪光的现象, 可以产生闪烁现象的物质称为闪烁体。 ()

4. 半导体辐射探测器的基本结构是 PN 结, 在辐射照射下可产生电子-空穴对, 在电场作用下可引起电信号。 ()

5. 非晶硅辐射探测器由闪烁体、非晶硅层 (光电二极管阵列)、TFT 阵列 (大面积薄膜晶体管阵列) 等构成。它是一种直接转换的辐射探测器。 ()

6. 在非晶硅分立辐射探测器中, 入射射线由非晶硅光电二极管阵列转换为测量信号。 ()

7. 非晶硒分立辐射探测器, 主要结构包括非晶硒光电二极管阵列、TFT 阵列和读出电路, 它是一种直接转换型辐射探测器。 ()

8. CCD 和 CMOS 辐射探测器, 都采用闪烁体将射线转换为光, 然后由感光器件将光信号转变为电信号。 ()

9. 非晶硅辐射探测器的基本空间分辨率, 由其像素尺寸决定。 ()

10. 在一定照射剂量范围内, 探测器规格化信噪比随照射剂量平方根增大而增大。 ()
11. 目前的 IP 板分类类别由 IP 板本身性能决定, 与使用的扫描读出装置无关。 ()
12. 在图像增强器中完成的转换过程可概括为: 射线→电子→可见光 (荧光)。 ()
13. 在 A/D 转换器中, 转换过程包括取样、保持、量化、编码四个步骤。 ()
14. 平板孔像质计的 EPS 灵敏度与阶梯孔像质计灵敏度意义相同。 ()
15. 双丝像质计编号为 1 的丝对的丝材料为钨, 直径为 0.80mm。 ()
16. 一般说, 线对卡只适用于测定数字射线检测系统的空间分辨率。 ()

三、问答题

1. 简单叙述气体辐射探测器、闪烁辐射探测器、半导体辐射探测器的探测原理。
2. 简单叙述非晶硅辐射探测器的基本结构与射线信号转换过程。
3. 简单叙述非晶硒辐射探测器的基本结构与射线信号转换过程。
4. 简单说明辐射探测器的基本性能。
5. 简单叙述 CR 技术成像板 (IP 板) 的基本结构与射线探测原理。
6. 简单叙述图像增强器的基本结构与射线信号转换过程。
7. 简述双丝型像质计的基本设计与测定射线检测不清晰度方法。
8. 简述线对卡的基本设计与测定射线检测不清晰度方法。

第3章

数字射线检测技术基本理论

说明：本章内容体系以Ⅲ级人员要求构成，但基本内容以Ⅱ级人员的要求编写，对于Ⅲ级人员增加了个别小节内容。关于采样定理的进一步理解，可参阅附录B。

3.1 数字图像概念

图3-1 是一幅图像的模拟图像与数字图像。从图中可以看到，模拟图像给出的是物体特性连续变化的情况，数字图像给出的是物体特性阶跃式变化的情况。可见数字图像不同于常规的模拟图像。

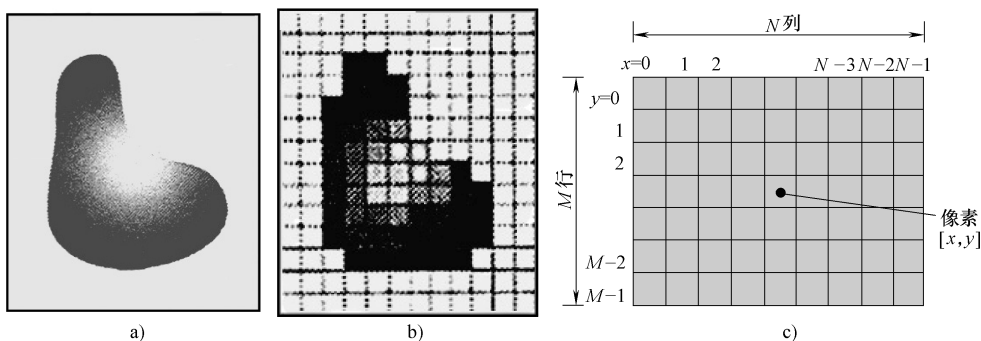


图 3-1 数字图像与模拟图像的比较

a) 模拟图像 b) 数字图像 c) 数字图像矩阵

数字图像由一个个分立小区构成，这些分立小区是数字图像的基本单元，称为像素（像元）。每个像素是图像的一个尺寸大小固定的小区，在该区内具有单一的幅度值，这是数字图像的基本特点。对二维平面数字图像，一幅图像是由 M 行、 N 列（即 $M \times N$ ）个像素构成的一个矩阵。

像素尺寸定义为图像矩阵的行或列中相邻二像素中心的距离，因此可能出现像

素在不同方向具有不同尺寸的情况。通常情况下，像素为正方形，在不同方向具有相同尺寸。像素尺寸常记为 P ，单位为毫米（mm）或微米（ μm ）。

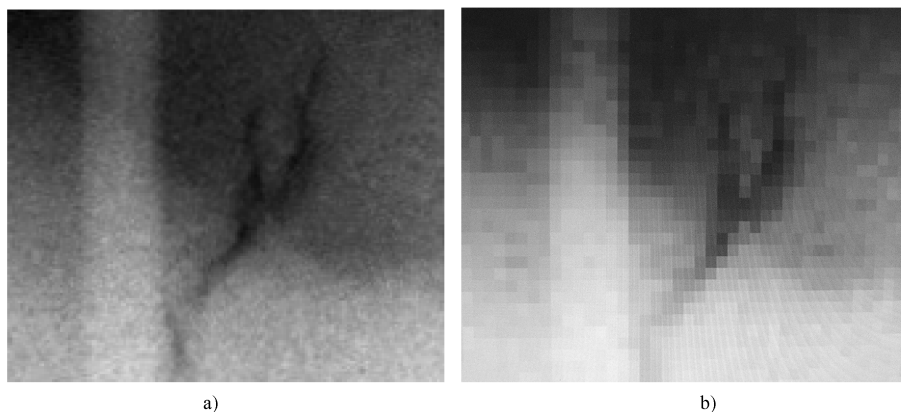


图 3-2 焊接裂纹射线检测的模拟图像和数字图像

a) 裂纹胶片射线照相图像 b) 裂纹图像的数字化图像

注：图 b 中竖直低黑度图像是像质计中直径 0.63mm 的丝。

图 3-2a、b 分别是一焊接裂纹射线检测的模拟图像和数字图像。数字图像的像素尺寸为 $0.084\text{mm} \times 0.084\text{mm}$ （为清楚作了放大）。通过它可清楚地看到从模拟图像到数字图像所带来的变化，也显示了数字图像像素的基本特点，或者说数字图像的基本特点。

数字射线检测技术得到的一般是灰度图像。灰度实际就是亮度，只不过反映的是人眼对亮度的感觉。对于灰度数字图像，像素是一个尺寸大小固定的小灰度区。在一个像素区图像具有单一的灰度值，该灰度值由像素区的平均灰度值决定。

数字图像的像素尺寸决定了数字图像的空间频率。空间频率是类似于时间频率引入的表示空间周期重复现象的概念。理论上，空间频率描述的是在空间按正弦曲线变化强度的周期现象。空间频率的常用单位为“线对/毫米（ Lp/mm ）”或“线对/厘米（ Lp/cm ）”。简单说，一个线对表示的是在单位长度内存在一个周期的正弦变化强度。空间频率值常简单用“线对值”，即单位长度内的线对数表示。

对于像素尺寸为 P （mm）的数字图像，由 Nyquist 采样理论可以得到其空间频率 f （ Lp/mm ）为

$$f = \frac{1}{2P}$$

例如，数字图像的像素尺寸 P 为 0.2mm ，则该数字图像的空间频率为 2.5Lp/mm 。显然，若在不同方向上像素尺寸不同，数字图像在不同方向也将有不同的空间频率。

在数字射线检测技术中，用金属丝对（即一对平行放置的直径相等的金属丝，

且中心距离等于2 倍直径，如双丝像质计的丝对）近似正弦强度变化。更简单的是采用一对相同宽度、中心距离等于2 倍宽度的平行矩形条，近似正弦强度变化。并用这样的器件测定图像的空间频率。这时，一个线对就是一根丝和一个宽度等于直径的空隙（或一个矩形条和一个同样宽度的空隙）。空间频率的线对值则是单位长度内可以含有的这种线对数。金属丝或矩形条的材料，对射线应具有很强的吸收特性。

3.2 图像数字化基本理论

3.2.1 图像数字化过程

从模拟图像转变为数字图像需要经过图像数字化过程。图像数字化过程主要是采样（抽样，取样）和量化。

采样（抽样，取样）过程是图像分布离散化过程。采样是对连续信号图像以一定的采样孔径（点）和一定的间距对图像信号抽样，将图像信号转换为离散信号序列，得到离散信号组成的图像。图 3-3 是图像采样过程的示意图。即图像采样是以图像的有限个信号值（离散值）表示连续信号图像。

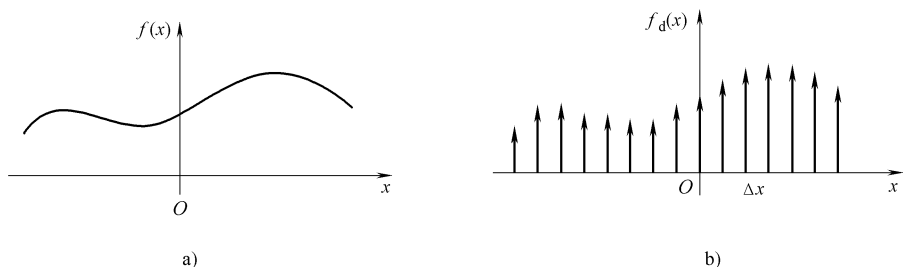


图 3-3 图像采样过程的示意图
a) 原图像信号 b) 采样得到的图像信号

两个采样点中心的间距构成“采样间隔”，它也是像素尺寸。图 3-4 显示了采样间隔与像素尺寸的关系。数字化的采样过程可以采用不同的采样方式，因此在不同方向可能具有不同的像素尺寸。但通常采用的是等间隔的方式。即像素一般为正方形。

采样间隔（像素尺寸）对得到的数字图像质量具有重要影响。图 3-5 显示了对同一幅图像在同样量化级别下以不同采样间隔（像素尺寸）获得的数字图像的比较。可见，随着采样间隔增大（像素尺寸增大），数字图像显示的细节减少。

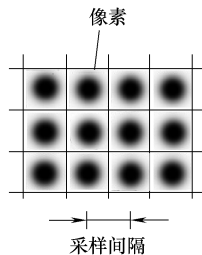


图 3-4 采样间隔与像素尺寸的关系

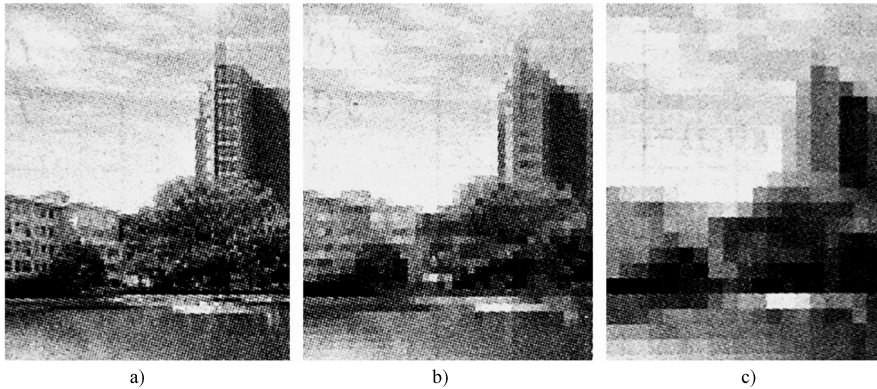


图 3-5 采样间隔（像素尺寸）对数字图像的影响（从 a 到 c 像素增大）

量化是图像幅值分布离散化过程。即将图像原来连续变化的幅值数字化，转变为有限个离散值。或者说，是用有限个允许值替代精确值。图 3-6 是量化过程的示意图（图中 A 为原连续变化的幅值， D 为量化后值，只能取刻度点的值）。即，量化必然是将分布在某一范围内的幅值均量化为某个数字化的幅值，因此量化过程必然产生误差，必然影响获得的数字图像质量。

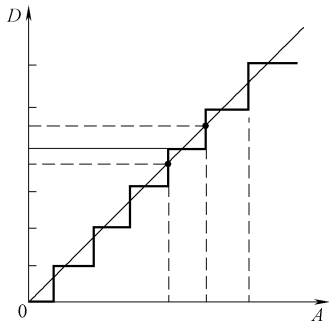


图 3-6 量化过程与量化误差示意图

图 3-7 显示的是对同一幅图像，在相同采样间隔（像素尺寸）下不同量化级数获得的数字图像。从图 a 到图 c 量化级数减少，图像显示细节也减少，从而清楚地显示了量化级数对图像显示细节的影响。

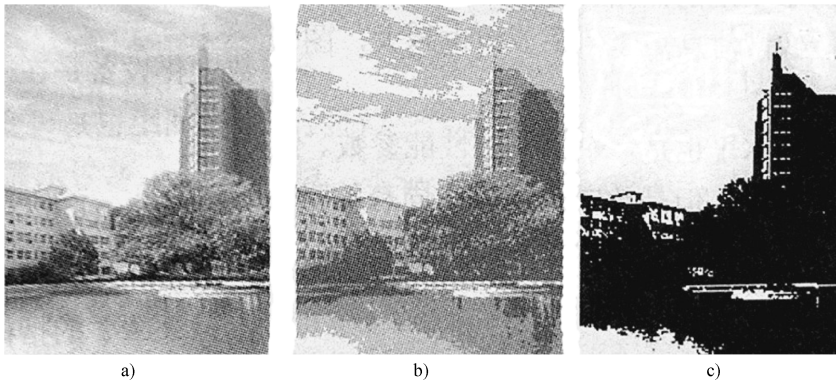


图 3-7 量化级数对数字图像显示细节的影响

a) 256 级 b) 8 级 c) 2 级

从上面的讨论可以看到，模拟图像经过数字化转变为数字图像可能带来影响，概括起来产生的主要影响是，可能丢失一些细小的细节信息，可能模糊、改变一些细小的细节信息。图 3-8 是这种影响的示意图，这说明，必须对图像数字化过程（技术）进行控制。

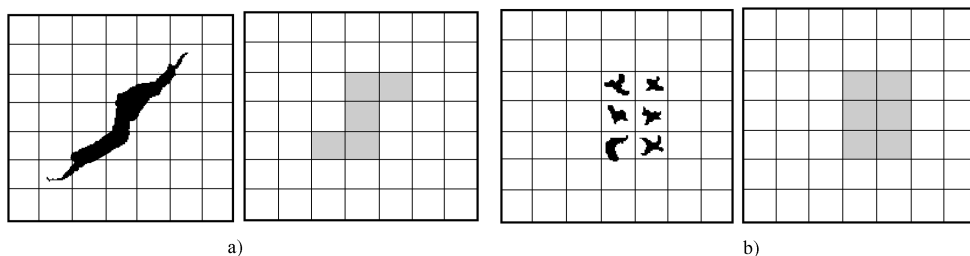


图 3-8 数字化对图像信息的影响
a) 丢失细小细节信息 b) 模糊改变细小细节信息

3.2.2 采样定理

采样过程控制的基本要求是应满足采样定理。

图 3-9 显示的是采用某一采样间隔对不同频率信号采样的情况。在该采样间隔下，不同的原始信号得到了相同的采样信号（见图中黑点分布）。显然，这时采样信号不能确定原始信号，或说不能正确地再现原始信号的信息。理论上，这称为出现“混叠”现象。

图像采样过程必须考虑的基本问题，是如何保证从采样得到的离散信号序列图像，能准确、唯一地恢复原来信号图像。简单理解时，可认为是如何保证抽样的离散信号序列图像不丢失、不改变原来连续信号图像的信息。

研究指出，为保证采样得到的离散信号图像能准确恢复原来连续信号图像的信息，采样间隔应足够小，需要满足的基本条件是采样频率应不小于原信号最高频率的 2 倍，这称为采样（取样，抽样）定理。

对于一维图像信号 $f(t)$ ，如果其包含的最高空间频率为 f_m ，若记 f_s 为采样频率，则采样定理要求

$$f_s \geq 2f_m \quad (3-1)$$

一般称其为奈奎斯特（Nequist）采样（取样，抽样）定理。它由奈奎斯特（Neq-

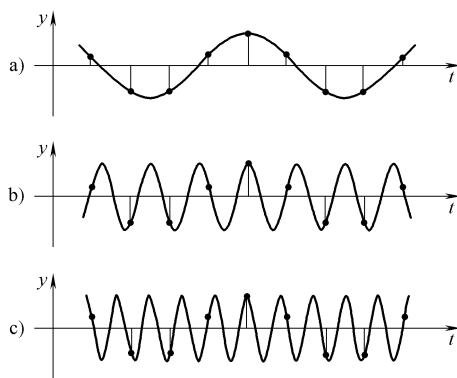


图 3-9 采样间隔与混叠

uist) 于 1928 年提出, 仙农 (Shannon) 于 1948 年从理论上给出严格证明。关于采样定理的进一步理解可参阅附录 B。

对于空间采样, 如果采样间隔 (像素尺寸) 为 P_s (mm), 则对应的 (空间) 采样频率 f_s (Lp/mm) 为

$$f_s = \frac{1}{2P_s}$$

其单位一般为线对/毫米 (Lp/mm)。如果图像的最高空间频率由尺寸为 D (mm) 的细节决定, 则其对应的最高空间频率为

$$f_m = \frac{1}{2D}$$

按采样定理, 则容易得到

$$P_s \leq \frac{1}{2}D \quad (3-2)$$

对于二维图像信号, 同样需要考虑采样定理问题。这时, 在两个方向 (x , y 方向) 都需要考虑采样间隔。它们都必须满足采样定理的要求, 否则会造成虚假信号, 不能正确地再现原来信号的信息。

3.2.3 量化方法

量化的基本方法是, 如果信号的最大幅值为 K , 量化幅值为 Δ , 离散值的个数 G 则为

$$G = \frac{K}{\Delta}$$

一般采用以比特 (bit) 为单位的值 (m) 表示量化后离散值的个数。 m 值按式 (3-3) 定义

$$m = \log_2 G = \log_2 \frac{K}{\Delta} \quad (3-3)$$

离散值的个数 G 则为, $G = 2^m$, 用 m 值 (bit, 比特) 表示的离散值的个数常称为幅值数字化“位”数, 也称为量化精度。例如, 幅值数字化为 12bit (12 位), 则是以最大幅值的 $1/2^{12}$ ($1/4096$) 为量化幅值。即图像的离散值个数为 $2^{12} = 4096$ 。

对数字射线检测技术得到的灰度图像, 量化就是给出各个像素的灰度值 (灰度级)。图 3-10 显示了灰度图像将白到黑量化为 256 级灰度的示意图。

量化得到的灰度值级别数目就是离散值的个数 G , 灰度级 G 一般采用 2 的整数幂表示, 即 $G = 2^m$ 。这时, 常用 m 值表示灰度级数 G ,

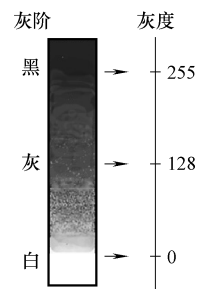


图 3-10 灰度量化示意图 (8bit)

其单位显然就是比特 (bit)。例如, 说图像的灰度级为 8bit (8 位), 则它的灰度级 G 的级别数目应为 $G = 2^8 = 256$, 即该系统得到的灰度图像将白到黑所划分的级别数目为 256 级。显然, 灰度图像划分的灰度级别数越多, 其区分不同对比度的能力越高。

在数字射线检测技术中, 如果幅值数字化精度小 (量化位数少), 则小对比度细节信息在量化中将被丢失。为了更好地表示原来的模拟信号, 希望量化幅值 (间隔) 尽可能小, 以给出尽量多的数字化离散值。

对于人类眼睛视觉, 由于视觉对灰度分辨能力的限制, 一般认为黑白灰度图像采用 8bit 左右的量化精度显示就可获得眼睛认为清晰的图像。但在数字射线检测技术中, 由于可进行数字图像处理 (例如, 开窗显示局部), 因此为了获得更多的细节信息, 则希望达到 16bit 或更高的量化精度。然而又由于实际的 A/D 转换器的精度限制, 以及所存在的噪声信号, 不可能将量化幅值无限制地缩小, 因此也就不能得到更多的离散值。

目前, 数字射线检测技术 A/D 转换器的量化位数, 一般都可以达到 14bit, 稍高一些的量化位数可以达到 16bit。

3.3 数字射线检测图像质量

数字射线检测图像质量的三个基本因素是对比度、空间分辨率和信噪比。对比度表征的是检测图像在射线透照方向的分辨能力, 空间分辨率表征的是检测图像在垂直射线透照方向的分辨能力, 信噪比是检测图像的信号与噪声之比, 直接关系到检测图像可实现的对比度。

3.3.1 图像对比度

在数字射线检测技术中, 数字图像的对比度与胶片射线照相的对比度一样, 其具体意义也是图像识别厚度差的能力。评价图像的对比度, 一般都采用常规像质计灵敏度。即采用胶片射线照相检验技术中的像质计, 测定数字图像的对比度, 监测数字射线检测技术检测图像的对比度。

按照射线检测技术的物理基础, 射线检测技术获得的 (物体) 对比度为

$$\frac{\Delta I}{I} = - \frac{\mu \Delta T}{1 + n}$$

通常认为, 在显示器屏幕上给出的图像亮度与射线强度呈线性关系。即屏幕的亮度 L 与射线强度 I 的关系可写为

$$L = kI$$

式中 k ——常数。

因此对由一小厚度差 ΔT 引起的图像亮度对比度 (理论上一般记为 C) 可以写出

$$C = \frac{\Delta L}{L} = - \frac{\mu \Delta T}{1 + n}$$

即获得的检测图像亮度对比度由射线检测技术获得的（物体）对比度决定。

若进一步考虑，还应考虑眼睛观察过程。按照生理学的研究，人眼感觉到的图像明亮程度与照明亮度间服从对数正比关系

$$B = K \ln L$$

式中 B ——人眼感觉到的图像亮度；

K ——人眼对亮度的感度系数。

因此眼睛在显示器屏幕上观察到的图像对比度 ΔB 与亮度对比度的关系为

$$\Delta B = K \ln \frac{L'}{L} = K \ln \left(\frac{L + \Delta L}{L} \right) = K \ln \left(1 + \frac{\Delta L}{L} \right)$$

当显示器上的图像亮度对比度很小时，利用 $\ln(1 + x) \approx x$ （当 x 远小于 1 时），则近似有

$$\Delta B = K \frac{\Delta L}{L} \quad (3-4)$$

可见，数字射线检测技术的图像亮度对比度，基本影响因素是射线检测技术获得的物体对比度。实际上它还会受到图像数字化过程、图像空间分辨率的影响。例如，由于量化幅值较大，可使小对比度细节信息在量化中丢失，造成对比度损失。图 3-11 显示的是量化对裂纹图像的影响。对于这种情况，不可能通过后续的图像增强处理而再现该裂纹细节的信息。

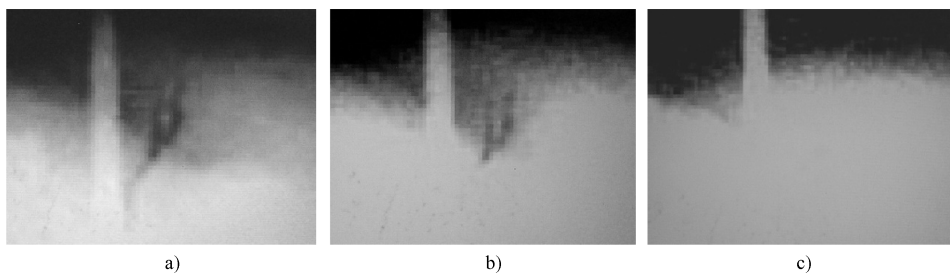


图 3-11 量化对裂纹图像的影响
a) 256 级 b) 32 级 c) 16 级

关于图像的对比度，在数字射线检测技术中还常引入另外两个概念：对比度噪声比（常记为 CNS ）和对比度灵敏度（常记为 CS ）。对比度噪声比定义为两个图像区的平均信号差与信号平均值统计标准差之比。对比度灵敏度定义为图像（由灰度改变）可识别的物体最小百分比厚度差。实际上这两个概念主要是针对美国的平板孔型像质计确定的概念，对它们将在后面关于信噪比概念中作进一步讨论。

3.3.2 图像空间分辨率

1. 空间分辨率概念

数字图像的空间分辨率（力），限定了图像所能分辨的、处于与射线束垂直平面内的细节（缺陷）的最小尺寸，或者说，限定了图像可以分辨的细节最小间距。图 3-12 显示的是三个空间分辨率不同的成像系统对同一细节得到的图像。从左向右，系统的空间分辨率依次增高。可见，空间分辨率高的系统给出清晰的细节图像，空间分辨率低的系统给出的图像不能反映细节的真实情况。

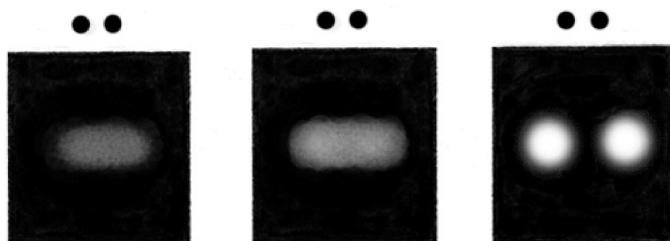


图 3-12 空间分辨率对细节图像的影响

在数字射线检测技术中，图像的空间分辨率采用双丝像质计测定，通常用图像不清晰度或图像可分辨的最高空间频率表示。不清晰度单位通常是毫米（mm），空间频率常用的单位是 L_p/mm （线对/毫米）。此外，也可以用单位长度内的像素个数或用像素尺寸表示。

2. 检测技术的不清晰度

对于数字射线检测技术，类似于胶片射线照相检测技术，不清晰度可以归纳为几何不清晰度 U_g 和探测器固有模糊度 U_D 。检测技术不清晰度 U 由几何不清晰度和探测器固有模糊度决定。可以采用平方关系（欧洲标准、国际标准化组织标准）

$$U^2 = U_g^2 + U_D^2$$

也可以采用立方关系（美国标准）

$$U^3 = U_g^3 + U_D^3$$

将胶片射线照相检测技术中给出的几何不清晰度表示式

$$U_g = \frac{\phi T}{F - T}$$

改写为

$$U_g = \frac{\phi T}{F - T} = \frac{\phi(F - f)}{f}$$

式中 ϕ ——射线源焦点尺寸；

T ——工件厚度；

F ——射线源至探测器距离；

f ——射线源至工件表面距离。

按图 3-13 所示符号，定义透照布置的放大倍数 M

$$M = \frac{F}{f} \quad (3-5)$$

则可写为

$$U_g = \phi(M - 1) \quad (3-6)$$

这样，检测技术不清晰度则为

$$U = \sqrt{[\phi(M - 1)]^2 + U_D^2} \quad (3-7)$$

或

$$U = \sqrt[3]{[\phi(M - 1)]^3 + U_D^3} \quad (3-8)$$

引用探测器（系统）的固有不清晰与探测器（系统）基本空间分辨率关系

$$U_D = 2SR_b$$

检测技术不清晰度可以写成更一般的形式

$$U = \sqrt{[\phi(M - 1)]^2 + (2SR_b)^2} \quad (3-9)$$

或

$$U = \sqrt[3]{[\phi(M - 1)]^3 + (2SR_b)^3} \quad (3-10)$$

从这些关系式可以看到，数字射线检测技术不清晰度（空间分辨率）相关于辐射探测器（系统）的基本空间分辨率（固有不清晰度）、射线源的焦点尺寸和采用的放大倍数。

3. 检测图像不清晰度

关于获得的检测图像不清晰度，也就是测定的图像不清晰度。

简单地说，如图 3-14 所示，可

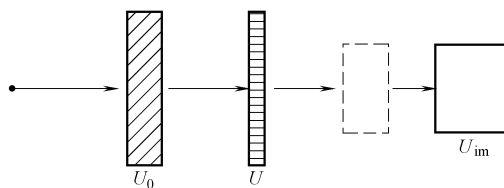


图 3-14 数字射线检测技术不清晰度

以引入物体（工件）处不清晰度 U_0 和检测图像不清晰度 U_{im} 。可以认为，检测技术不清晰度 U 与物体（工件）处不清晰度 U_0 的关系为

$$U = MU_0$$

因此有

$$U_0 = \frac{1}{M}U$$

检测图像测定的不清晰度是物体处不清晰度，因此对直接数字化射线检测技术，简单地有

$$U_{\text{im}} = U_0$$

这样就可以写出检测图像不清晰度的一般表示式

$$U_{\text{im}} = \frac{1}{M} \sqrt{[\phi(M-1)]^2 + U_0^2} \quad (3-11)$$

$$U_{\text{im}} = \frac{1}{M} \sqrt{[\phi(M-1)]^2 + (2SR_b)^2} \quad (3-12)$$

或

$$U_{\text{im}} = \frac{1}{M} \sqrt[3]{[\phi(M-1)]^3 + U_0^3} \quad (3-13)$$

$$U_{\text{im}} = \frac{1}{M} \sqrt[3]{[\phi(M-1)]^3 + (2SR_b)^3} \quad (3-14)$$

对间接数字化射线检测技术，只要注意上面关系式中出现的是“探测器系统”的固有不清晰度、基本空间分辨率，则有同样的检测图像不清晰度表示式。它们给出了数字射线检测技术检测图像不清晰度与各因素的关系。例如，对于分立辐射探测器构成的数字射线检测系统，若辐射探测器的像素尺寸为 $200\mu\text{m}$ ，射线源焦点尺寸分别为 0.4mm 和 2mm ，可计算在不同放大倍数下的检测图像不清晰度和可分辨的最高空间频率值，结果列在表 3-1 中。

表 3-1 计算的检测图像不清晰度与可分辨的最大线对值

条件	探测器像素尺寸为 $200\mu\text{m}$ ，射线源焦点尺寸为 0.4mm					
放大倍数	1	1.5	2.0	2.5	3	4
不清晰度/mm	0.4	0.2773	0.2520	0.2617	0.2773	0.3037
线对值/ (Lp/mm)	2.5	3.61	3.97	3.82	3.61	3.29
条件	探测器像素尺寸为 $200\mu\text{m}$ ，射线源焦点尺寸为 2.0mm					
放大倍数	1	1.1	1.5	2.0	3	4
不清晰度/mm	0.4	0.3782	0.6805	1.0026	1.3338	1.5001
线对值/ (Lp/mm)	2.5	2.64	1.47	1.0	0.75	0.67

实际情况是，对具有一定厚度的工件，不同厚度部位将具有不同的放大倍数，因此也将有不同空间分辨率，尽管实际中多数情况下差别可能很小。

若利用探测器（系统）有效像素尺寸与探测器（系统）的固有不清晰度存在的关系

$$P_e = \frac{U_0}{2}$$

则上面的检测图像不清晰度还可改写为

$$U_{\text{im}} = \frac{1}{M} \sqrt{[\phi(M-1)]^2 + (2P_e)^2} \quad (3-15)$$

或

$$U_{\text{im}} = \frac{1}{M} \sqrt[3]{[\phi(M-1)]^3 + (2P_e)^3} \quad (3-16)$$

实际处理时，一般用探测器（系统）像素尺寸作为有效像素尺寸。

需要注意的是，在 ASTM E2698-10（使用 DDA 的射线检测方法）标准中，关于数字射线检测图像不清晰度的关系式是

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt[3]{[\phi(M-1)]^3 + (1.6SR_b)^3}$$

该式相当于采用的是

$$U_D \approx 1.6SR_b = 1.6P_e$$

可能的原因是其确定检测图像可分辨的最高空间频率的依据不同。

4. 图像不清晰值与空间频率线对值的关系

图像不清晰值 U_{im} (mm)（注意，由于在不放大时图像不清晰值与检测技术不清晰值相等，有时会省略下标）与空间频率线对值 R (Lp/mm) 互为倒数关系。即

$$R_{im} = \frac{1}{U_{im}} \quad (3-17)$$

采用双丝像质计测定时，按双丝像质计使用中的叙述，因有

$$U_{im} = 2d$$

式中 d ——测定时双丝像质计中不能区分为丝对的最大丝直径。

线对值 R 与丝直径（或金属线条宽度，mm） d 的关系为

$$R = \frac{1}{2d} \quad (3-18)$$

例如，用双丝像质计测定某图像的不清晰度时，不能区分为丝对的最大丝直径为 0.1mm，则该图像的不清晰度为 0.2mm，对应的线对值为 5 Lp/mm。

图像的空间分辨率，有时也用单位长度（常用 1mm）内含有的像素数目表示。像素数与空间频率的基本关系是 1Lp/mm 内含有 2 个像素。若记 1mm 长度内含有的像素数目为 N_0 ，则对应的空间频率线对值应为

$$R = \frac{N_0}{2} \quad (3-19)$$

这样，如果像素尺寸为 P (mm)，因有

$$N_0 = \frac{1}{P}$$

故也就有（即前面给出的空间采样频率与像素尺寸关系）

$$R = \frac{1}{2P}$$

从一般的成像理论，被检验物体可认为由具有不同空间频率的部分组成。物体的轮廓构成低频部分，物体的层次构成中频部分，物体的细节（及其中的不同尺寸的缺陷）构成高频部分。记某结构尺寸为 D ，则该尺寸结构对应的空间频率为

$$R = \frac{1}{2D} \quad (3-20)$$

因此为了有效地检验物体中的缺陷（完整地使物体各部分成像），数字射线检测技术图像必须达到一定的空间分辨率。图 3-15 显示的是不同采样间隔（即图像不同空间分辨率）对裂纹图像的影响。从理论上，图像空间分辨率必须满足采样定理要求，即检测图像像素决定的空间频率（采样频率）必须不小于缺陷（细节）尺寸对应空间频率（信号最高空间频率）的 2 倍，才可能可靠分辨小尺寸缺陷。

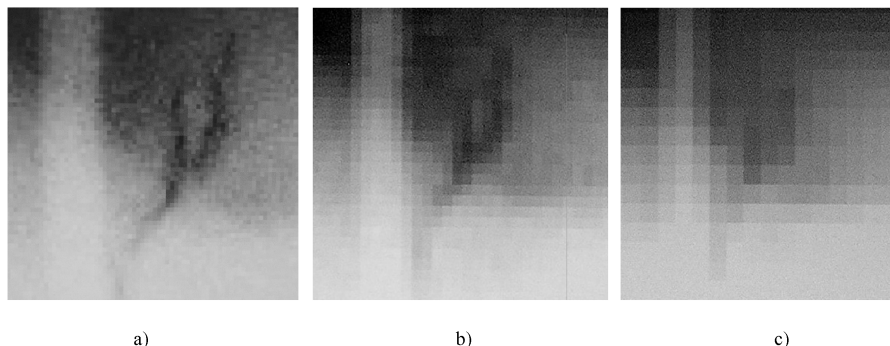


图 3-15 采样间隔对裂纹图像的影响

a) 采样间隔 0.042mm b) 采样间隔 0.084mm c) 采样间隔 0.254mm

* 5. 瑞利判据

数字射线检测技术中，采用双丝像质计测定的图像空间分辨率，依据的应该是瑞利判据，如图 3-16 所示。瑞利判据指出，对于两等强度的孤立线像，如果中心马鞍点的灰度小于峰值灰度的 0.811（通常简单地用 0.8），则认为此二线可以区分；对于两等强度的孤立点像，如果中心马鞍点的灰度小于峰值灰度的 0.735，则认为此二点可以区分。

按照瑞利判据，在测定了（某个条件下获得的）图像不同空间频率的对比度时，则可确定（在该条件下）图像的空间分辨率。依据瑞利判据确定的图像空间分辨率，给出的实际是两个细节处于可分辨与不可分辨临界情况。

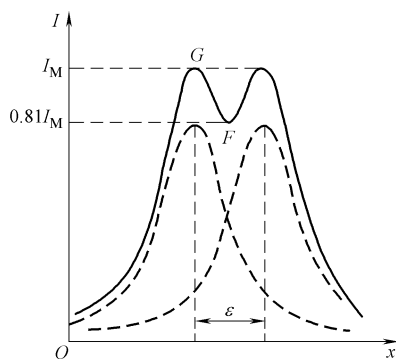


图 3-16 瑞利判据

* 3.3.3 图像信噪比 SNR

1. 信噪比概念

检测图像质量的另一主要因素是信噪比，通常记为 SNR 。信噪比定义为检测图像某区的平均信号与该区信号的统计标准差之比。图 3-17 显示了信噪比对检测图像质量的影响情况。信噪比是检测图像实现一定对比度的基础。

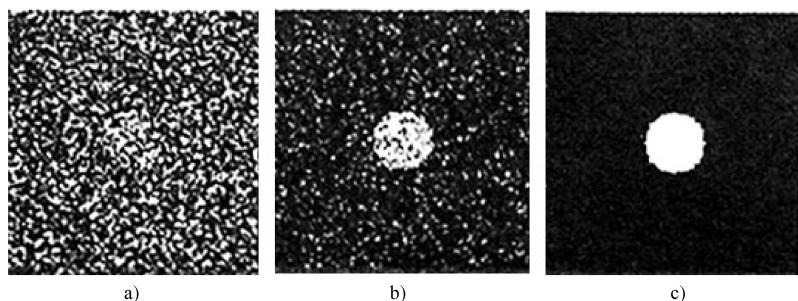


图 3-17 信噪比对检测图像质量的影响

a) 信噪比很低 b) 信噪比低 c) 信噪比高

信号是探测器对射线剂量响应的记录。噪声是探测器对射线剂量响应变化（偏差）的记录。若记检测图像某区的平均信号为 S 、该区信号的统计标准差为 σ ，则有

$$SNR = \frac{S}{\sigma} \quad (3-21)$$

对于灰度图像，若记图像像素的灰度为 GV ，则有

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n GV_i$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (GV_i - GV_a)^2}$$

式中 GV_i ——图像第 i 个像素的灰度值；

n ——测定图像区像素的数目；

GV_a ——测定图像区像素灰度的平均值。

透射的射线束信号形成检测图像过程中，在探测器系统中将经过不同的能量转换阶段，这些转换过程的特性与探测器本身的结构特性相关，与射线的线质（射线能谱分布）相关。它们决定了检测图像的信号与噪声特点。

简单地说，射线信号按线性关系转换为检测图像信号（即探测器工作在线性响应范围）。出现的噪声信号源，归纳起来主要是量子噪声、结构噪声、电子噪声。量子噪声是射线源的射线发射、射线在被检测物体中的吸收、探测器的射线吸收等的量子起伏决定的噪声。结构噪声是 DDA 探测器各单元性能的差异或 IP 板荧光层敏感性的差异产生的噪声。电子噪声是电子热运动引起的探测器器件单元、电路部分的性能变化导致的热噪声。电子噪声原则上可以采取适当措施消除或减少。对 DDA 探测器，结构噪声可以通过探测器响应校正消除到一定程度；对 IP 板当曝光量较大时必须考虑结构噪声，这限制了 IP 板系统可获得更高的信噪比。量子噪声是必须考虑的噪声。

量子噪声可认为服从泊松分布。如果形成检测图像信号的射线量子数为 N ，

则简单有

$$\sigma = k \sqrt{N}$$

因这时信号为 $S = kN$ ，故有

$$SNR = \frac{kN}{k \sqrt{N}} = \sqrt{N}$$

即信噪比将随形成检测图像信号的射线量子数的平方根增加。一般地说，则是随曝光量增加而增加。正如前面叙述的，当曝光量增加到一定程度后，则需要考虑结构噪声的限制。

检测图像可达到的信噪比决定于所使用的探测器系统性能和采用的射线检测技术因素，因此为达到希望的检测图像信噪比要求，必须选择适宜的探测器系统和正确确定检测技术参数。对于选定的探测器系统和检测技术参数，可从图像质量的对比度间接估计信噪比。

2. 信噪比与对比度灵敏度

信噪比直接影响检测图像的细节对比度，一定的图像信噪比是形成图像细节对比度的基础。

对于数字射线检测技术的检测图像，从检测图像信噪比概念与检测图像对比度噪声比概念，可以简单地建立某小厚度差 ΔT 的对比度噪声比（ CNR ）与信噪比（ SNR ）的关系。

记： I 为形成检测图像的射线信号， σ_1 为对应的检测图像噪声，考虑到探测器工作在线性响应范围，则可写出

$$\begin{aligned} CNR &= \frac{\Delta I}{\sigma_1} \\ SNR &= \frac{I}{\sigma_1} \\ \frac{CNR}{SNR} &= \frac{\Delta I}{I} = - \frac{\mu \Delta T}{1 + n} \\ CNR &= - \frac{\mu \Delta T}{1 + n} SNR \end{aligned}$$

它表示对于某一具体检测问题（对象固定、主要检测技术固定），其检测图像的对比度噪声比正比于信噪比。

按照对比度灵敏度（ CS ）概念，若记 GBV 是识别小厚度差 ΔT （平板孔型像质计板厚 T_{101} ）所需要的对比度噪声比（例如，ASTM E2737-10 给出对于航空航天应用为 2.5），则可写出对比度灵敏度 CS 与对比度噪声比间的下面关系（见 ASTM E2737-10）：

$$CS(\%) = \frac{GBV}{CNR} \times \frac{\Delta T}{T} \times 100\%$$

代入对比度噪声比与信噪比关系，则可得到

$$CS(\%) = \left(-\frac{1+n}{\mu T} \right) \times \frac{GBV}{SNR} \times 100\% \quad (3-22)$$

也即,对于某一具体检测问题(对象固定、主要检测技术固定),检测图像的对比度灵敏度正比于信噪比,因此随检测图像信噪比提高,检测图像的对比度灵敏度将提高(对比度灵敏度的值越大,则对比度灵敏度越差;对比度灵敏度的值越小,则对比度灵敏度越好)。可见,对某一检验问题,对于所采用的射线检测技术,对比度灵敏度随信噪比增加而提高(值减小)。

美国材料试验学会标准给出一个粗略的估计是,对比度灵敏度达到1%时要求信噪比(SNR)应达到250;对比度灵敏度达到2%时要求信噪比(SNR)应达到130。这可作为选择探测器和确定曝光量参数的一个考虑方面。DDA探测器,通过探测器响应校正可获得远高于胶片的信噪比(例如,DDA可达到700~800,但胶片因观片灯亮度水平,限制了达到更高的信噪比,通常只能达到200~250之间),因此可获得很高的对比度。

IP板因受结构噪声限制,一般分辨率的IP板通常最大只能达到140左右,高分辨率的IP板通常最大能达到200左右。这可参考ISO 17636-2:2013标准中给出的IP板规格化信噪比与图像灰度关系的回归计算式

$$SNR_N = 35.56 \ln(GV) - 127.72$$

按此式计算,即使在图像灰度达到4000(即14bit量化)规格化信噪比也仅为167左右。

* 3.4 细节(缺陷)分辨能力

射线检测技术不清晰度直接影响可分辨的细节(缺陷)最小尺寸。简单地依据不清晰度对细节对比度的影响,采用直线不清晰度曲线处理不清晰度对细节对比度的影响,可以给出不清晰度对分辨细节(缺陷)能力的影响。图3-18显示了不清晰度为 U 时对宽度尺寸为 D 周期细节的影响结果(这里的 U 实际是指图像不清晰度,在不放大的情况下,检测技术不清晰度与图像不清晰度相同)。

1. 采样定理确定的图像分辨细节能力

按照采样定理可处理图像不清晰度与所能分辨的细节(缺陷)最小尺寸关系。采样定理要求

$$f_s \geq 2f_m$$

式中 f_s ——采样频率(Lp/mm);

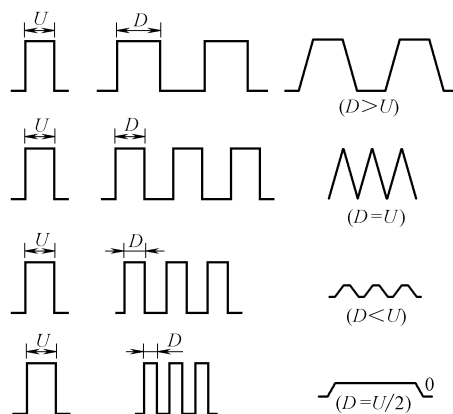


图3-18 不清晰度对细节成像的影响

f_m ——检测图像（可实现）的最高空间频率（Lp/mm）。

对所讨论的不清晰度与所能分辨的细节（缺陷）最小尺寸关系问题，图像不清晰度决定了采样频率，细节（缺陷）尺寸决定了检测图像希望分辨的空间频率。具体关系可如下决定

$$f_s = \frac{1}{U_{im}}$$

$$f_m = \frac{1}{2D}$$

式中 U_{im} ——检测图像不清晰度（mm）；

D ——细节（缺陷）尺寸（mm）。

这样，按采样定理有

$$\frac{1}{U_{im}} \geq 2 \times \frac{1}{2D}$$

整理得到

$$U_{im} \leq D \quad (3-23)$$

也就是对于射线检测技术不清晰度为 U ，在一定的放大（ M ）透照布置下，可分辨的细节（缺陷）最小尺寸应满足的条件是

$$\frac{1}{M}U \leq D_{min}$$

ASTM E1000 标准中规定，在一定的放大（ M ）透照布置下，为了能分辨一个尺寸为 D 的细节（缺陷）， $MD \geq U$ 应该是满足采样定理的条件。

从图 3-18 可以看到，在该条件下可分辨细节的对比度峰值保持不降低。即按采样定理确定的图像分辨细节条件，是保证细节的对比度峰值不降低的分辨条件。

按前面讨论的数字射线检测图像不清晰度，可改写上面的关系式。若按美国标准给出的数字射线检测技术的不清晰度

$$U = \sqrt[3]{[\phi(M-1)]^3 + (2SR_b)^3}$$

则可分辨的细节（缺陷）最小尺寸 D 应满足的条件是

$$D_{min} = \frac{1}{M} \sqrt[3]{[\phi(M-1)]^3 + (2SR_b)^3} \quad (3-24)$$

若按欧洲标准、ISO 标准，因有

$$U = \sqrt{[\phi(M-1)]^2 + (2SR_b)^2}$$

则应得到

$$D_{min} = \frac{1}{M} \sqrt{[\phi(M-1)]^2 + (2SR_b)^2} \quad (3-25)$$

如果采用有效像素尺寸代替基本空间分辨率表示不清晰度，则上面的关系式可以写成下面形式（按美国标准）

$$D_{\min} = \frac{1}{M} \sqrt{[\phi(M-1)]^3 + (2P_e)^3}$$

或（按欧洲标准、ISO 标准）

$$D_{\min} = \frac{1}{M} \sqrt{[\phi(M-1)]^2 + (2P_e)^2}$$

2. 瑞利判据确定的图像分辨细节能力

在实际中，也存在按瑞利判据确定图像分辨细节能力的处理。按依据瑞利判据采用双丝像质计测定图像不清晰度的规定 $U_{\text{im}} = 2d$ ，因丝对对应的空间频率为 $f_d = \frac{1}{2d} = f_m$ ，图像不清晰度对应的空间频率为 $f_{\text{im}} = \frac{1}{U_{\text{im}}} = f_s$ ，因此按瑞利判据确定图像分辨细节能力的处理，实际对应的是 $f_s = f_m$ 。这种处理，粗略地可认为是细节的对比度峰值降低为 1/2 值的分辨条件（图 3-18 最下面情况），实际是细节处于可分辨与不可分辨的临界情况。

复习参考题

一、选择题（每题的四个选项中只有一个正确答案，请将正确答案的序号填在题末括号内）

- 下面关于数字图像特点的叙述中，存在错误的是（ ）。
 - 数字图像的基本单元是像素
 - 像素区内具有单一的幅度值
 - 一幅数字图像的像素具有固定尺寸
 - 数字图像只能显示为灰度图像
- 下面关于图像数字化的叙述中，存在错误的是（ ）。
 - 图像数字化主要过程是采样和量化
 - 图像量化是图像幅值离散化的过程
 - 采样间隔越小，数字图像越模糊
 - 量化决定了图像所能显示的灰度级别
- 下面给出的“采样间隔”尺寸叙述中，错误的是（ ）。
 - 两个采样点中心的间距
 - 两个像素点中心的间距
 - 像素尺寸的 1/2
 - 可认为等于像素尺寸
- 一幅灰度图像的灰度级别数目为 1024，下面给出的其对应的灰度级中，正确的是（ ）。
 - 8bit
 - 10bit
 - 12bit
 - 14bit
- 当不采用放大透照布置时，如果要求数字图像的空间分辨率达到 4Lp/mm，下面列出的分立辐射探测器像素尺寸中，满足要求的是（ ）。
 - 0.25mm
 - 0.20mm
 - 0.15mm
 - 0.12mm
- 下面关于数字射线检测图像的空间分辨率的叙述中，存在错误的是（ ）。
 - 空间分辨率决定了图像能分辨的最小细节尺寸

- B. 空间分辨率可采用图像不清晰度值或（空间频率）线对值表示
- C. 分立辐射探测器的像素尺寸直接影响空间分辨率
- D. IP 板可获得恒定空间分辨率的数字图像
7. 某数字图像的像素尺寸为 0.2mm，下面给出的该数字图像的空间频率中，正确的是（ ）。
- A. 5Lp/mm B. 4Lp/mm C. 3Lp/mm D. 2.5Lp/mm
8. 如果图像的最小细节尺寸为 0.2mm，按采样定理要求，下面给出的对该图像数字化允许使用的最大像素尺寸中，正确的是（ ）。
- A. 0.4mm B. 0.3mm C. 0.2mm D. 0.1mm

二、判断题（正确的画√，错误的画×）

1. 数字图像的基本特点，它是一个像素矩阵，每个像素是图像的一个尺寸大小固定的小区，在该区内具有单一的幅度值。（ ）
2. 图像采样是对连续信号图像以一定的采样孔径（点）和一定的间距对图像抽样，将图像转换为离散信号序列，得到离散信号组成图像的过程。（ ）
3. 图像数字化由采样（取样）、量化两个基本过程完成。采样是图像分布的离散化过程，量化是图像幅值的离散化过程。（ ）
4. 图像数字化过程包括采样和量化。为了保证获得的数字图像质量，采样应满足采样（抽样，取样）定理，量化必须达到 8bit。（ ）
5. 对于图像数字化过程，随着像素尺寸增大，可使数字图像变得模糊，甚至不能给出实际图像的形貌。（ ）
6. 随着量化幅度（间隔）增大，图像灰度级别数减少，数字图像显示的细节情况也会减少。（ ）
7. 在数字射线检测技术中，如果采样间隔大，则小细节（缺陷）的信息在采样中可能被丢失。（ ）
8. 对于图像数字化过程，图像幅值量化产生的图像细节损失，可通过后续的数字图像增强处理得到恢复，从而保证数字图像质量。（ ）
9. 辐射探测器对射线探测和转换过程的特点及其像素尺寸，是数字射线检测图像空间分辨率的基本影响因素。（ ）
10. 对采用分立辐射探测器的数字射线检测技术，分立辐射探测器的像素尺寸，是检测图像空间分辨率的基本限制因素。（ ）
11. 数字射线检测技术的图像亮度对比度的主要影响因素，是射线检测技术获得的物体对比度。（ ）
12. 数字检测系统的基本空间分辨率，表示的是系统可分辨的最小几何细节，其可作为系统的有效像素尺寸。（ ）

三、计算题

1. 某用分立辐射探测器构成的数字射线检测技术系统，要求达到空间分辨率线对值为 4.0Lp/mm 。不采用放大透照布置时，求可采用的辐射探测器的像素尺寸最大值。
2. 若辐射探测器的像素尺寸为 $200\mu\text{m}$ ，射线源焦点尺寸为 0.6mm ，采用的放大倍数为 2，计算这时检测图像不清晰度和空间分辨率的线对值。

四、问答题

1. 简述数字射线检测技术图像空间分辨率的影响因素。
2. 简述数字射线检测技术系统的基本空间分辨率概念。
3. 简述数字检测技术系统的基本空间分辨率概念与测定方法。
4. 简述数字检测技术图像的信噪比概念及它与对比度灵敏度的关系。

第4章

数字射线检测基本技术

说明：本章内容体系以Ⅲ级人员要求构成，基本内容针对Ⅲ级人员。对于Ⅱ级人员要求的是其中基本技术部分小节的内容。

4.1 概述

这里讨论的数字射线检测基本技术，针对的是日常工业应用的直接数字化射线检测技术和间接数字化射线检测技术。

直接数字化射线检测技术直接给出数字化的射线检测图像，间接数字化射线检测技术需要单独技术环节来完成图像数字化过程给出数字化的射线检测图像。概括直接数字化射线检测技术和间接数字化射线检测技术的检测过程，它们都可分为透照、信号探测与转换、图像显示与评定三个基本阶段。在透照过程中，按照射线的吸收规律形成反映工件信息的射线强度分布信号，即检测初始信号。在信号探测与转换过程中，探测器（系统）对此信号进行探测、转换、数字化采样和量化，形成数字检测图像。在图像显示与评定过程中，图像显示和处理单元接收传送数字检测图像，供检测人员处理与评定。

对于一项检测工作，为保证检测满足工件技术条件或验收标准规定的要求，或者满足数字射线检测技术标准技术级别规定的检测图像质量要求（或说可实现的缺陷检测要求），上述的数字射线检测技术过程，需要处理的主要技术内容可分为四部分：探测器系统选择（或说数字射线检测技术系统选择）、透照技术、图像数字化技术、显示与观察技术（包括图像处理技术）。为保证检测处于稳定可靠状态，还应考虑技术稳定性控制方面。这几个方面，可认为共同构成了一个完成检测工作的检测技术系统。检测技术系统所涉及的各方面的相互关系如图 4-1 所示。即实现数字射线检测技术标准的技术级别或完成一项具体检测工作，需要按照图 4-1 所示考虑构成一个数字射线检测技术系统。

实际构成（设计）数字射线检测技术系统时，是按图 4-1 中从后向前顺序考虑，建立需要的（满足标准技术级别或技术条件、验收标准要求）技术。即技术

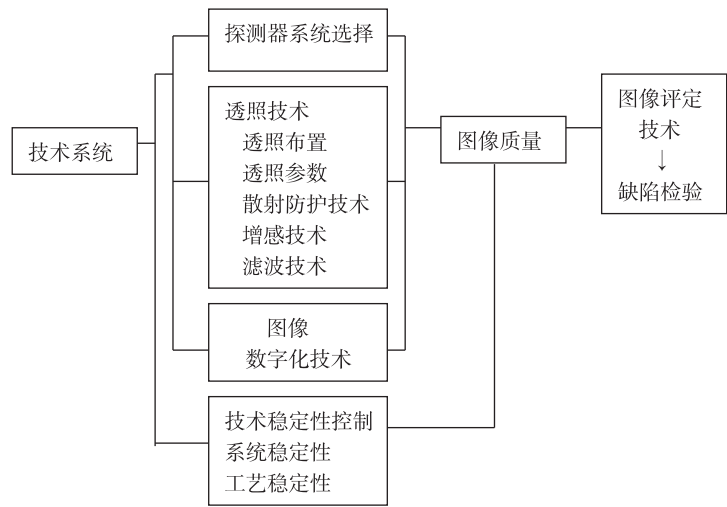


图 4-1 数字射线检测技术系统构成

系统构成是从需要检验的缺陷要求（或选定的技术级别），确定必须达到的检测图像质量；从检测图像质量确定必须选用的探测器系统、透照技术控制、图像数字化技术控制。图像评定技术是基于眼睛视觉特性设计的技术，一般说不具有特定检测工作特性。技术稳定性控制是保证所使用技术系统稳定、检测技术稳定，从而保证检测图像质量稳定的措施，其也具有通用性特点。因此在设计检测的技术系统时，需要处理的主要是探测器系统选择、透照技术控制、图像数字化技术控制。这些应是数字射线检测基本技术处理的核心问题。

4.2 探测器系统选择

4.2.1 概述

探测器系统，对于直接数字化射线检测技术就是探测器，对于间接数字化射线检测技术，除了探测器（如 CR 技术的 IP 板）还包括后续的图像数字化单元（如 CR 技术的 IP 板读出装置、软件、参数）。探测器系统选择，实际是构成数字射线检测技术系统的关键。

探测器系统性能影响检测信号、影响检测图像的各个质量因素，表 4-1 从检测图像成像质量角度列出了探测器的影响。可见，探测器系统性能对于检测信号的探测、转换，直到最后获得的检测图像质量都具有重要影响。探测器系统性能决定了数字射线检测技术系统的性能。也就是说，在技术系统中探测器系统选择处于基础地位，因此它成为构成满足检测工作要求技术系统的关键环节。这与胶片射线照相

检测技术级别中正确选择胶片类似。对于一定的检测工作，显然必须采用满足一定性能要求的探测器系统。

通常，探测器系统选择也常简单地说是成数字射线检测技术系统选择。

表 4-1 影响检测图像成像质量的探测器因素

因素分类	与探测器相关的方面
影响检测信号因素	射线探测介质的射线吸收、像素器件的填充情况
影响图像噪声因素	射线探测介质的结构、使用的校准方法、二次量子吸收
影响图像对比度因素	探测器内散射
影响图像空间分辨率因素	射线探测介质材料、厚度和像素化程度，像素尺寸，散射

图 4-2 是有关研究给出的探测器系统的基本空间分辨率和规格化信噪比对缺陷检测的影响。可见，为获得满意的检测结果，探测器系统应同时具有较高的基本空间分辨率和可达到较高的规格化信噪比。即所选择的探测器系统的基本空间分辨率（像素尺寸）和规格化信噪比，应能够获得所要求的检测图像的对比度和不清晰度（空间分辨率）。

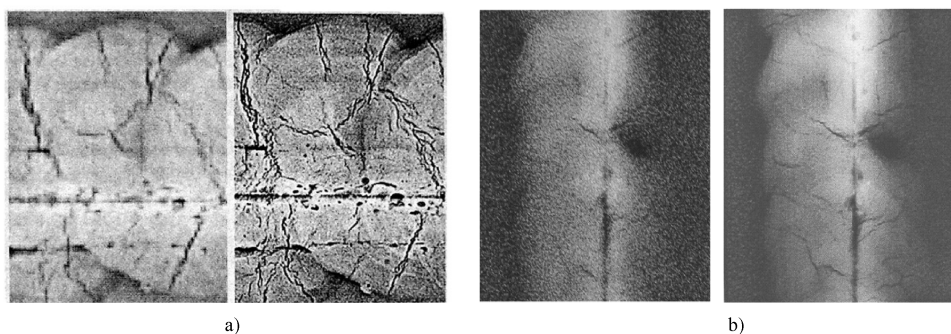


图 4-2 探测器系统的基本空间分辨率和规格化信噪比对缺陷检测的影响
a) 基本空间分辨率影响（左图空间分辨率低） b) 规格化信噪比影响（左图信噪比低）

探测器系统的基本空间分辨率和规格化信噪比，是探测器系统的基本性能，它直接影响获得的检测图像质量。下面讨论的探测器系统选择是针对通常条件下采用的检测技术（即已经确定了检测图像质量要求），确定所选择探测器系统的基本空间分辨率和规格化信噪比。

4.2.2 探测器系统选择的基本依据

数字射线检测技术基本理论给出的检测图像不清晰度关系式为

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt[3]{[\phi(M-1)]^3 + (2SR_b)^3}$$

或

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt{[\phi(M-1)]^2 + (2SR_b)^2}$$

上式明确给出了探测器系统基本空间分辨率对获得的检测图像不清晰度的影响。

按照数字射线检测技术采用的信噪比 (SNR)、对比度噪声比 (CNR)、对比度灵敏度 (CS) 概念的下面关系

$$CS = \frac{GBV}{SNR} \times \left(-\frac{1+n}{\mu T} \right) \times 100\%$$

若引用规格化信噪比概念

$$SNR_N = SNR \times \frac{88.6}{SR_b}$$

则上式可进一步改写为

$$CS = \left(-\frac{1+n}{\mu T} \right) \left(\frac{88.6}{SR_b} \right) \frac{GBV}{SNR_N} \times 100\% \quad (4-1)$$

式中 GBV——识别像质细节需要的对比度噪声比。

这个关系式显示了探测器系统规格化信噪比对获得的检测图像对比度的影响。

实际选用探测器系统, 显然还会考虑检验对象的材料类型、厚度范围、产品验收条件 (缺陷检验要求) 和检验速度等。

* 4.2.3 基本空间分辨率选择

探测器系统的基本空间分辨率, 由探测器的结构特性 (射线转换介质与过程、像素尺寸) 和相关部分 (单元) 特性决定。一般说, 也就是探测器系统的有效像素尺寸, 通常可简单认为是像素尺寸。确定探测器系统的基本空间分辨率时, 应基于检测图像不清晰度值。

按检测图像不清晰度与探测器 (系统) 基本空间分辨率的关系, 则可确定需要的探测器 (系统) 基本空间分辨率。

在不采用放大透照布置时, 检测图像的空间分辨率将由探测器 (系统) 的像素尺寸决定。当采用放大透照技术时, 则需要考虑射线源的尺寸与所采用的放大倍数。即这时会变得复杂一些。

关于选择探测器 (系统) 的基本空间分辨率, 其他的考虑主要是在满足检测图像空间分辨率要求的探测器 (系统) 中, 应选择其中像素尺寸大的探测器 (系统), 以便获得更高的信噪比, 得到更高的对比度灵敏度。

在 ASTM E2736-10 标准中给出了一个简单的实际处理方法, 其推荐用不少于 3 个像素覆盖期望检验的缺陷最小尺寸, 尽量使用多于 6 个像素覆盖期望检验的缺陷最小尺寸, 这可作为参考。

* 4.2.4 规格化信噪比选择

按照检测图像对比度灵敏度与探测器系统信噪比之间存在的关系，检测图像为达到一定的对比度灵敏度，应选择可达到一定信噪比的探测器系统。

不同的探测器（系统）结构不同、特性不同，可达到的信噪比也不同。同一探测器，在不同的曝光量下可达到的信噪比不同。图 4-3 显示了有关研究给出的实际的探测器规格化信噪比与曝光量（剂量平方根，mGy）的一般关系。该曲线的主要部分遵守指数函数规律

$$y = ae^{b/x} \quad (b < 0)$$

在初始的一段（曝光量较小区），也可以采用对数函数近似

$$y = A \ln x + B$$

上二式中，函数 y 表示规格化信噪比，变量 x 是采用剂量平方根表示的曝光量。

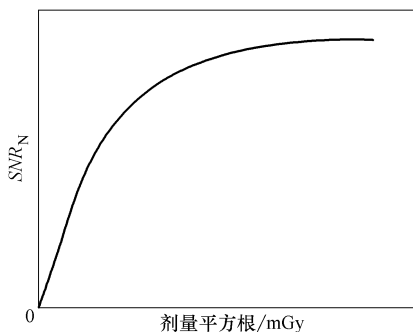


图 4-3 探测器规格化信噪比与曝光量的一般关系

选择的原则，是在适当曝光量下探测器系统应可达到一定信噪比，保证检测图像达到一定的对比度灵敏度。也就是，选择在适当曝光量下可达到一定信噪比的探测器系统。即希望选择在达到饱和值前就可以达到较高规格化信噪比的探测器。例如，按相关标准规定，在此区规格化信噪比就应能达到不小于 120。对 DDA 探测器，经过适当探测器响应校正后，饱和规格化信噪比一般都可达到 500 以上。对 IP 板系统，则与系统本身特性相关。一般的 IP 板系统其饱和规格化信噪比为 140 左右；性能更好的 IP 板系统其饱和规格化信噪比可达到 250 左右。

实际处理时，当数字射线检测技术标准有关于检测图像规格化信噪比明确规定时，可依据标准规定数据确定需要的探测器。当检测技术标准无检测图像规格化信噪比明确规定时，可从阶梯孔像质计灵敏度值（线型像质计灵敏度值对应的），确定应达到的厚度百分比灵敏度，参考上面叙述的 ASTM E2736 标准推荐，初步确定需要的探测器规格化信噪比。

4.3 数字射线检测透照技术控制

4.3.1 概述

1. 透照技术控制的基本考虑

透照技术是获得要求质量检测图像的基础环节，表 4-2 概括了影响检测图像成像质量的射线源和技术因素。透照技术控制的核心是获得更高的物体对比度信号和

更高的空间分辨率，使检测图像获得更高对比度和更小不清晰度。透照技术主要是处理透照布置（透照方式、透照方向、一次透照区）、透照参数（射线能量、焦距、曝光量）、散射线防护等。对于动态检测方式，透照技术还需要考虑拾取信号的检测参数，即动态扫描过程控制参数（主要是扫描方式、扫描速度）。此外，对于分立辐射探测器（DDA），透照技术中还应包括探测器响应校正和坏像素修正，但它们应采用探测器（DDA）制造厂提供的软件和规定的程序进行。

表 4-2 影响检测图像成像质量的射线源和技术因素

因素分类	与射线源和技术相关的因素
影响检测信号的因素	射线束谱、射线束流、曝光时间、帧累积、源与探测器距离
影响图像噪声的因素	信号水平、像素平均、帧平均、散射信号
影响图像对比度的因素	射线束谱、物体散射、场所散射
影响图像空间分辨率的因素	几何不清晰度、焦点尺寸、放大倍数

2. 透照技术控制理论

对数字射线检测技术，由于初始检测信号为

$$\frac{\Delta I}{I} = - \frac{\mu \Delta T}{1 + n}$$

而探测器系统的后续转换，可认为按线性关系完成，这样，检测图像的亮度对比度则有

$$C = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta I}{I}$$

这是透照技术控制检测图像对比度的基本出发点。此外，必须考虑的是检测图像对比度灵敏度与信噪比的关系

$$CS = \frac{GBV}{SNR} \times \left(- \frac{1 + n}{\mu T} \right) \times 100\%$$

由于检测图像不清晰度与技术因素间存在下面关系

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt{[\phi(M - 1)]^3 + (2SR_b)^3}$$

或

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt{[\phi(M - 1)]^2 + (2SR_b)^2}$$

在处理透照技术时，为保证检测图像不清晰度，则必须考虑该关系式。

这些关系式是处理透照技术的理论基础。

3. 透照技术控制基本原则

对于数字射线检测技术，按照上面列出的处理透照技术的理论基础关系式，显

然在透照布置、透照参数等基本方面应与胶片射线照相检测技术采用同样的原则。

1) 对透照布置处理, 选取透照方式的基本原则是有利于缺陷检验; 在一般情况下, 中心射线束应垂直指向一次透照区的中心, 当希望检验的主要缺陷具有延伸方向性时, 应选取该方向作为透照方向; 一次透照区控制仍采用按技术级别规定透照厚度比。应注意的特殊要求是, 对于一次透照区, 检测图像信噪比应满足有关标准的规定。

2) 关于透照参数, 主要是射线能量、焦距、曝光量。射线能量的基本控制是在具有适当穿透能力下选用较低的射线能量; 焦距实际仍是控制几何不清晰度和一次透照区, 也应是按技术级别限制可使用的最小射线源到工件源侧表面的距离; 曝光量应正确选择, 保证检测图像的信噪比达到一定要求。

3) 必须采取适宜的散射线防护措施。

4.3.2 最佳放大倍数

对于数字射线检测技术, 按照检测图像不清晰度的基本关系式, 当射线源焦点尺寸小于探测器固有不清晰度时, 可以采用放大透照方式。放大倍数定义为

$$M = \frac{F}{f} \quad (4-2)$$

式中 f ——射线源与工件源侧表面的距离;

F ——射线源与工件胶片侧表面的距离。

最佳放大倍数是对某个数字射线检测技术系统, 可使检测图像获得最高空间分辨率 (最小不清晰度) 的放大倍数。

最佳放大倍数可从检测图像不清晰度的基本关系确定

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt[3]{[\phi(M-1)]^3 + U_D^3}$$

即将检测图像不清晰度作为放大倍数函数, 通过求极值确定最佳放大倍数。

首先求 U_{im} 对 M 的偏导数, 得到

$$\frac{\partial U_{im}}{\partial M} = \frac{\phi^3 M(M-1)^2 - \phi^3 (M-1)^3 - U_D^3}{M^2 [\sqrt[3]{\phi^3 (M-1)^3 + U_D^3}]^2}$$

为得到最佳放大倍数, 应令

$$\frac{\partial U_{im}}{\partial M} = 0$$

从此得到, 对于最佳放大倍数时, 应有

$$M\phi^3 (M-1)^2 - \phi^3 (M-1)^3 - U_D^3 = 0$$

解此方程, 则得到最佳放大倍数表示式

$$M_0 = 1 + \left(\frac{U_D}{\phi} \right)^{3/2} \quad (4-3)$$

利用探测器（系统）固有不清晰度与其基本空间分辨率关系

$$U_D = 2SR_b$$

式（4-3）可写为

$$M_0 = 1 + \left(\frac{2SR_b}{\phi}\right)^{3/2} \tag{4-4}$$

当总的不清晰度采用二次方关系时（欧洲标准、ISO 标准），即检测图像不清晰度的基本关系采用

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt{[\phi(M-1)]^2 + U_D^2}$$

则最佳放大倍数表示式为

$$M_0 = 1 + \left(\frac{U_D}{\phi}\right)^2 \tag{4-5}$$

或

$$M_0 = 1 + \left(\frac{2SR_b}{\phi}\right)^2 \tag{4-6}$$

采用这种关系式，计算结果与三次方关系的差别不大。

从式（4-3）~式（4-6）可以看出，最佳放大倍数由辐射探测器基本空间分辨率（固有不清晰度）和射线源尺寸决定。对于一个具体的辐射探测器，只有采用焦点尺寸较小的射线源，才能选用较大的放大倍数。如果射线源焦点尺寸较大，则只能采用放大倍数近似为1的透照布置。表4-3列出的是不同像素尺寸的分立辐射探测器的最佳放大倍数计算值，该表清楚说明了这种情况。表4-4列出的是对于像素尺寸为200μm的探测器，射线源焦点尺寸为0.4mm时计算的放大倍数与检测图像不清晰度，可见，在最佳放大倍数下可获得最高的空间分辨率，图4-4显示了测量结果，与计算一致。

表 4-3 不同像素尺寸的分立辐射探测器的最佳放大倍数计算值

焦点尺寸/mm		0.2	0.4	0.8	1.0	3.0	5.5
最佳放大倍数	127μm	2.43	1.50	1.18	1.13	1.02	1.01
	143μm	2.71	1.60	1.21	1.15	1.03	1.01
	200μm	3.83	2.00	1.35	1.25	1.05	1.02

表 4-4 放大倍数与检测图像不清晰度（像素尺寸200μm，焦点尺寸为0.4mm）

放大倍数	1.0	1.2	2.0	4.0	6.0	10
图像不清晰度/mm	0.4	0.3342	0.2550	0.3036	0.3342	0.3602
对应双丝像质计测定值	D7	接近 D8	D9	D8	接近 D8	近似 D7

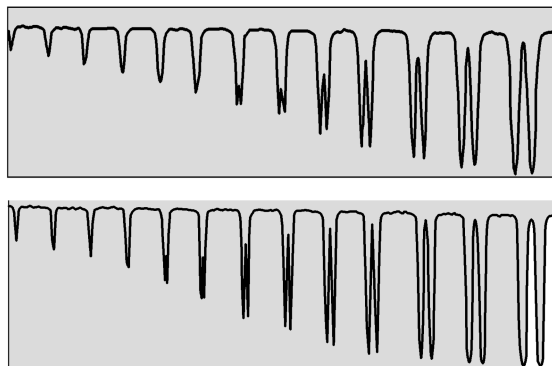


图 4-4 双丝像质计测定值与放大倍数关系（上图放大倍数为 1，下图放大倍数为 2）

* 4.3.3 曝光曲线

1. 曝光曲线概述

对数字射线检测技术，由于初始检测信号仍然是按射线吸收规律形成的物体对比度

$$\frac{\Delta I}{I} = -\frac{\mu \Delta T}{1 + n}$$

因此可以类似于胶片射线照相检测技术制作同样样式的曝光曲线图，用于确定透照参数。需要注意的是，这时曝光曲线制作条件中发生了胶片→探测器（系统）、黑度→规格化信噪比的改变。此外，按使用的探测器（系统）不同，曝光量单位也可能发生改变。曝光曲线的典型样式的一个例子如图 4-5 所示。

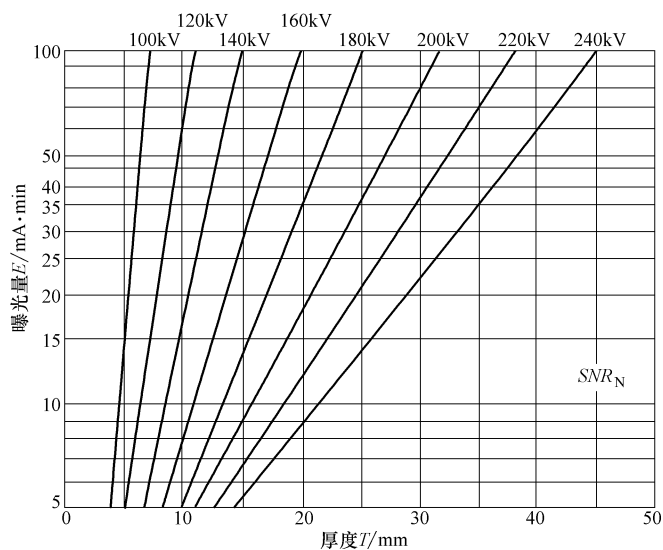


图 4-5 曝光曲线的典型样式

2. 曝光曲线函数关系

由图 4-5 可见, 曝光量对数与透照厚度之间的函数关系如下

$$\lg E = kT + C \quad (4-7)$$

$$k = \mu lge \quad (4-8)$$

式中 E ——曝光量 ($\text{mA} \cdot \text{min}$);

T ——透照厚度 (mm);

k ——曝光曲线的斜率;

μ ——线衰减系数;

C ——常数。

对 X 射线假设所使用的连续谱 X 射线已近似单色化, 并且互易律成立, 则可从射线的衰减规律、X 射线源在空间一点的辐射强度公式、曝光量概念等导出该函数关系。

对圆锥式辐射 X 射线源, 在空间一点所产生的射线强度为

$$I_0 = \alpha i Z V^2 / F^2$$

式中 i ——X 射线管电流;

V ——X 射线管电压;

Z ——物质的原子序数;

I_0 ——空间一点的射线强度;

F ——射线源与空间一点的距离;

α ——系数。

对以透照电压为参数的曝光曲线, 由于透照电压和焦距为固定值, 故可以引入

$$K_1 = \alpha Z V^2 / F^2$$

可得出

$$I_0 = K_1 i$$

为简单起见, 按窄束、单色射线处理, 在射线透射一定厚度的工件后, 射线强度为

$$I = I_0 e^{-\mu T}$$

或写为

$$I = K_1 i e^{-\mu T}$$

对探测器的曝光量 H 则为

$$H = It = K_1 i t e^{-\mu T}$$

两边取对数

$$\lg H = \lg(it) - \mu T lge + \lg K_1$$

在某透照电压 (射线能量) 下, 由于某探测器 (系统) 使检测图像达到一定规格化信噪比需要的曝光量为确定值, 即曝光量应为常数, 因此可引入常数

$$\lg H = K_2$$

代入上式, 整理得到

$$\lg(it) = (\mu lge)T + (K_2 - \lg K_1)$$

按照通常的记法, 引入 $E = it, k = \mu lge, C = K_2 - \lg K_1$, 则得到

$$\lg E = kT + C$$

3. 曝光曲线确定透照参数基本方法

如果制作曝光曲线的条件与检测技术要求相同, 从曝光曲线确定透照参数的基本过程应是:

- 1) 确定透照厚度 T 。
- 2) 按检测技术标准对透照电压 (射线能量) 的限定, 选择适宜的透照电压线。
- 3) 确定透照厚度与透照电压线交点对应曝光量数据。

如果曝光曲线的规格化信噪比低于检测技术标准要求的检测图像规格化信噪比, 则需要对曝光量做出修正。

为完成这种修正, 显然必须有所使用探测器 (系统) 的规格化信噪比与剂量关系曲线。这个探测器 (系统) 的规格化信噪比与剂量关系曲线, 与探测器特性、结构相关, 与使用的条件 (射线能量、透照厚度等) 相关。因此应针对检测技术应用测定所使用探测器 (系统) 的规格化信噪比与剂量关系曲线。有了该曲线, 则可如图 4-6 所示进行曝光量修正。

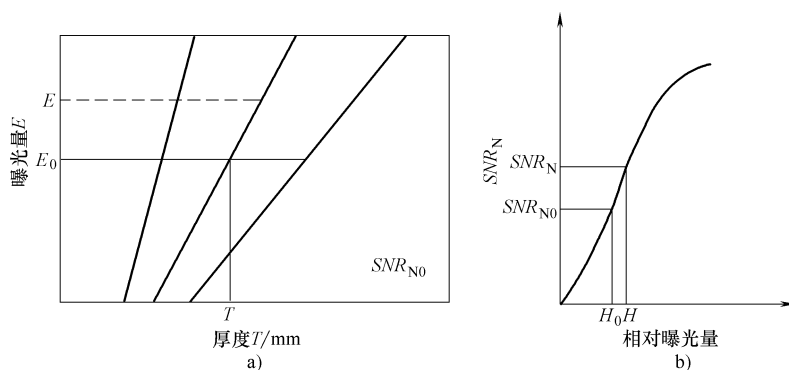


图 4-6 规格化信噪比不同的曝光量修正

设曝光曲线的规格化信噪比为 SNR_{N0} , 检测技术标准要求的规格化信噪比为 SNR_N 。若确定的曝光量为 E_0 , 则修正后的曝光量 E 应为

$$E = E_0 \frac{H}{H_0}$$

运用此式需要注意的是, 规格化信噪比与剂量关系曲线中, 相对曝光量 H 坐标采用的单位是与曝光曲线曝光量 E 的单位呈线性关系的单位。

4. 一次透照区规格化信噪比估计

实际情况中, 应用曝光曲线确定透照参数需要考虑的另一情况, 是一次透照区

存在一定厚度范围，即可认为属于变截面工件透照情况，这时需要估计按曝光曲线确定的曝光量得到的一次透照区检测图像的规格化信噪比是否满足检测技术标准规定要求。图 4-7 显示了处理这种情况的基本过程。

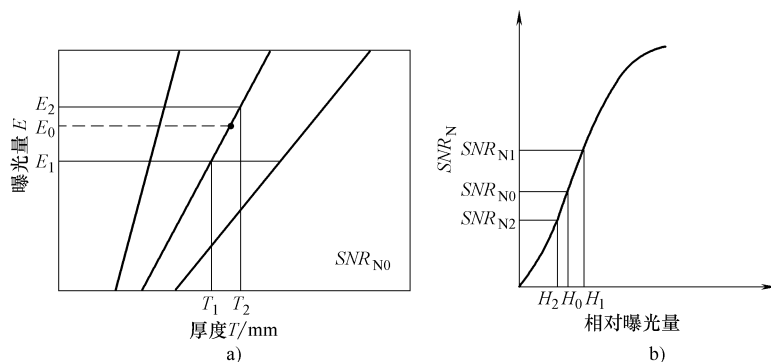


图 4-7 一次透照区的规格化信噪比估计

按变截面工件透照技术，透照厚度应如下确定

$$T = \frac{1}{3}(T_1 + T_2)$$

以该厚度从曝光曲线确定透照电压和不同厚度的曝光量数据：

- 1) T 厚度获得规格化信噪比 SNR_{N0} 需要的曝光量为 E_0 。
- 2) T_1 厚度获得规格化信噪比 SNR_{N0} 需要的曝光量为 E_1 。
- 3) T_2 厚度获得规格化信噪比 SNR_{N0} 需要的曝光量为 E_2 。

在探测器（系统）的规格化信噪比与剂量关系曲线中，达到规格化信噪比 SNR_{N0} 需要的相对曝光量为 H_0 。则当采用 E_0 曝光量进行透照时有以下关系。

- 1) T_1 厚度区给予探测器的相对曝光量 H_1 为

$$H_1 = H_0 \frac{E_0}{E_1}$$

- 2) T_2 厚度区给予探测器的相对曝光量 H_2 为

$$H_2 = H_0 \frac{E_0}{E_2}$$

利用得到的 H_1 、 H_2 数据，则从探测器（系统）的规格化信噪比与剂量关系曲线可确定 T_1 厚度区和 T_2 厚度区获得的规格化信噪比 SNR_{N1} 、 SNR_{N2} 。

如果这时存在规格化信噪比 SNR_{N1} 、 SNR_{N2} 不满足检测技术标准要求的情况，则可按前一段讨论进行进一步曝光量修正。使得最后选用的曝光量 E 可保证一次透照区的规格化信噪比满足检测技术标准规定要求。

* 4.3.4 动态检测方式技术控制

在射线源与被透照的物体处于相对运动的过程中，完成射线检测的技术方式称为动态检测方式。检测过程中工件的不同部分顺序通过扫描窗口，受到射线照射，完成射线检测图像采集。

1. 动态检测方式技术控制概述

在动态检测方式中，由于射线检测图像采集是在射线源与被透照的物体处于相对运动的过程中完成的，因此将引入运动不清晰度。

本质上，运动不清晰度可认为是相对运动改变了射线源焦点尺寸，从而导致几何不清晰度改变。如果记这时的几何不清晰度为 U_G ，则检测技术不清晰度应为

$$U^2 = U_G^2 + U_D^2$$

或

$$U^3 = U_G^3 + U_D^3$$

检测图像的不清晰度将为

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt{U_G^2 + U_D^2}$$

或

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt[3]{U_G^3 + U_D^3}$$

与静态检测方式的技术控制比较，动态检测方式技术控制的特殊方面主要是扫描窗口参数和扫描运动控制。后面的讨论将看到，扫描窗口参数直接影响这时的几何不清晰度。扫描运动控制应包括扫描速度和速度稳定性。由于工件仅在通过扫描窗口区才产生形成检测图像的曝光，因此扫描速度（相对运动速度）与窗口宽度共同决定了曝光量；扫描速度的稳定性（或说相对运动的稳定性）将影响曝光的均匀性。为了获得要求质量的检测图像，除了一般技术控制外，必须正确设计扫描窗口参数和扫描运动。

动态检测方式可以采用平移运动方式完成，也可以采用旋转运动方式完成。

2. 平移运动动态检测方式：扫描窗口处于工件射线源侧

一种平移运动动态检测方式的透照布置示意图如图 4-8 所示。

对这种透照布置，射线源与扫描窗口常固定成一个整体，采用适当的驱动机构，使射线源、扫描窗口及探测器，与工件沿扫描方向以适当的速度进行稳定的相对运动，在运动过程中完成射线检测。实际中，多数是射线源、扫描窗口及探测器固定不动，工件运动。

它主要应用于采用面探测器在大面积范围内获得较小影像变形的检测技术。

为了正确地设计动态检测方式技术，需要建立运动不清晰度引起的几何不清晰度的改变与相关因素的关系。

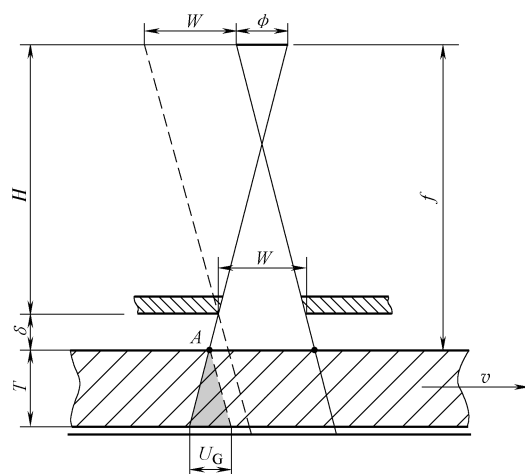


图 4-8 一种平移运动动态检测方式的透照布置（扫描窗口位于源侧）示意图

ϕ —射线源在扫描方向的焦点尺寸 W —扫描窗口在扫描方向的宽度

H —扫描窗口与射线源的距离 δ —扫描窗口与工件表面的距离

f —射线源与工件表面的距离 T —工件的厚度 v —射线源与工件的相对移动速度

观察图中工件表面 A 点，其从进入扫描窗口到离开扫描窗口，被射线照射形成的投影将如图 4-8 中阴影所示。按照一般的几何不清晰度概念和简单的三角形相似关系，动态检测方式这时的几何不清晰度应为

$$U_G = \frac{(\phi + W)T}{H}$$

由于 $f = H + \delta$ ，得到

$$U_G = \frac{(\phi + W)T}{f - \delta} \quad (4-9)$$

它清楚地给出了在平移运动方式这种动态检测透照布置下的几何不清晰度与相关因素的关系，显然这时的几何不清晰度比通常的静态检测方式增大。

如果记运动不清晰度为 U_m ，静态时的几何不清晰度为 U_g ，则可以认为

$$U_G = U_g + U_m$$

按图中的记号，则

$$U_g = \frac{\phi T}{f}$$

因此应有

$$U_m = U_G - U_g = \frac{(\phi + W)T}{H} - \frac{\phi T}{f}$$

由于 $f = H + \delta$

$$\frac{\phi T}{H} - \frac{\phi T}{f} = \frac{\delta \phi T}{fH}$$

则可得到

$$U_m = \frac{\delta\phi T}{fH} + \frac{WT}{H}$$

进行简单整理, 则得到

$$U_m = \frac{T}{f} \left[\frac{\delta(\phi + W)}{H} + W \right]$$

可见, 对图中所示的平移运动, 运动不清晰度与焦点尺寸、窗口宽度、扫描窗口与工件表面的距离、射线源与工件的距离等因素相关。若记

$$L = W + \frac{\delta(\phi + W)}{H} = W + \frac{\delta(\phi + W)}{f - \delta}$$

则运动不清晰度也可写为

$$U_m = \frac{LT}{f}$$

若记

$$\phi' = \phi + L = \phi + W + \frac{\delta(\phi + W)}{f - \delta}$$

即对于平移运动动态检测方式, 几何不清晰度又可以写成

$$U_G = \frac{\phi'T}{f}$$

可见, 由于动态检测方式的相对运动, 相当于焦点尺寸从原来的 ϕ 增大为 ϕ' 。

上面关于几何不清晰度的讨论, 可作为检测技术关于扫描窗口宽度和透照布置参数设计的指导。如果采用放大透照技术, 则这时检测图像的不清晰度可写为

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt{[\phi'(M-1)]^2 + (2SR_b)^2}$$

或者

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt{[\phi'(M-1)]^3 + (2SR_b)^3}$$

为保证以较小扫描窗口宽度达到一定的曝光量, 一种可能的处理方法是, 使工件多次通过扫描窗口, 这对扫描运动稳定性提出了更高要求。

3. 平移运动动态检测方式: 扫描窗口处于工件探测器侧

这种动态检测方式的透照布置示意图如图 4-9 所示, 应用于线阵探测器动态检测方式, 检测由软件控制, 检测图像由每次获得的一行图像数据合成。显然, 这时扫描运动除了影响曝光量外还构成了该方向的图像数字化采样间隔。

在这种透照布置下, 对不同的射线源尺寸、源到工件表面距离、扫描窗口宽度和高度 (厚度)、扫描窗口与工件表面距离, 射线源进入探测器的射线束交点 S 可以处于工件表面上、表面外射线源侧、表面内探测器侧不同位置 (如图 4-9b 图所示)。采用符号 Δ 表示射线束交点与工件射线源侧表面距离, 可简单讨论这时的几

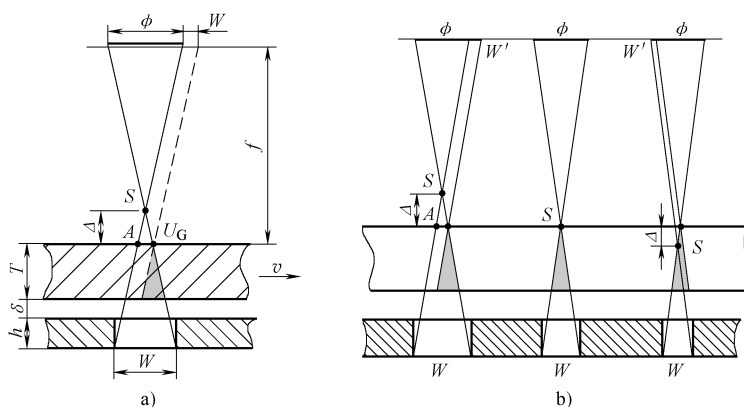


图 4-9 平移运动动态检测方式的透照布置（扫描窗口位于探测器侧）示意图

何不清晰度。

与上面讨论同样的思路，观察工件表面 A 点，当照射它的射线束通过扫描窗口区时，它形成的投影将如图中阴影所示。按照图中的三角形相似关系，可以写出几何不清晰度的表示式。按图 4-9a 的情况讨论（即射线束交点 S 位于工件表面外源侧），应有

$$U_G = \frac{(\phi + W')T}{f}$$

式中出现的 W' 是由 Δ 引起的一个可认为改变射线源尺寸的附加量值。按照三角形相似关系有

$$\frac{\phi}{f - \Delta} = \frac{W}{T + \delta + h + \Delta}$$

因此有

$$\Delta = \frac{fW - \phi(T + \delta + h)}{\phi + W} \quad (4-10)$$

因有

$$\frac{\Delta}{W'} = \frac{f - \Delta}{\phi}$$

所以

$$W' = \frac{\Delta\phi}{f - \Delta}$$

将式 (4-12) 代入，整理得到

$$W' = \frac{fW - \phi(T + \delta + h)}{f + (T + \delta + h)}$$

上述讨论结果为

$$U_G = \frac{(\phi + W')T}{f} \quad (4-11)$$

$$\Delta = \frac{fW - \phi(T + \delta + h)}{\phi + W} \quad (4-12)$$

$$W' = \frac{fW - \phi(T + \delta + h)}{f + (T + \delta + h)} \quad (4-13)$$

式(4-11) ~ 式(4-13)可以作为图4-9b中三种情况统一处理关系式使用。需要区别的是,这时计算得到的 Δ 值、 W' 值可能出现正、负、0三种情况。

- 1) $\Delta > 0$, 对应的是射线束交点 S 位于工件表面外射线源侧, W' 也为正值。
- 2) $\Delta = 0$, 对应的是射线束交点 S 位于工件表面上, W' 也为0值。
- 3) $\Delta < 0$, 对应的是射线束交点 S 位于工件表面内探测器侧, W' 也为负值。

实际检测技术下出现的一般都是射线束交点 S 位于工件表面外射线源侧情况。这时,将因检测的相对运动导致动态检测方式的几何不清晰度大于静态检测方式的几何不清晰度。这些关系式显示了动态检测方式的几何不清晰度与射线源焦点尺寸、源到工件表面距离、扫描窗口宽度与高度、扫描窗口与工件表面距离之间的关系。它们可作为设计这些技术因素的依据。

图4-10是采用像素尺寸为 $84\mu\text{m}$ 的线阵探测器以扫描方式获取的电阻点焊熔核裂纹图像与静态胶片射线照相检测图像。可见,动态检测获得了完整的检测图像。

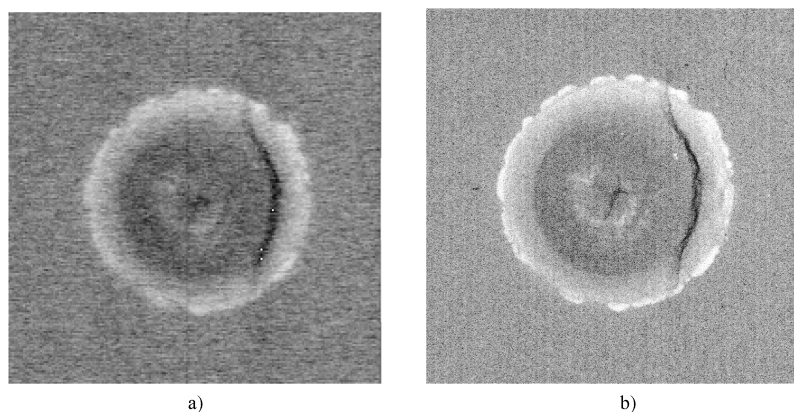


图4-10 电阻点焊熔核裂纹的线阵探测器检测图像与静态胶片射线照相检测图像
a) 线阵探测器扫描方式检测图像 b) 静态胶片射线照相检测图像

4. 旋转运动动态检测方式

除了平移运动动态检测方式,常见的还有旋转运动动态检测方式。它主要用于圆筒形工件,工件以适当速度围绕圆心轴旋转,在旋转过程中完成射线检测图像拾取。图4-11显示了旋转运动动态检测方式的透照布置示意图。

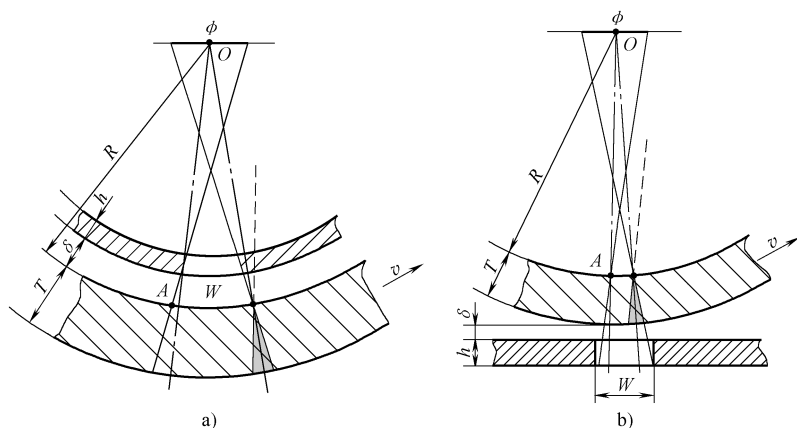


图 4-11 旋转运动动态检测方式的透照布置示意图

由于扫描窗口宽度小，工件通过扫描窗口时可认为处于平移运动状态，这时涉及的工件范围也可以近似认为是平面工件，因此对它的技术控制，可近似按上面平移运动动态检测方式处理。

4.4 数字射线检测其他技术控制

4.4.1 图像数字化技术控制

在数字射线检测技术中，通过图像数字化技术获得数字检测图像，它是保证数字检测图像质量的重要技术环节。如果不加控制，透照技术控制的结果可能受到很大损失。

按照图像数字化过程，控制应包括两个方面。一是图像数字化的采样间隔（采样频率），二是图像数字化的量化位数。采样间隔直接决定了检测图像的空间分辨率，同时影响细节图像对比度，量化位数直接决定了检测图像的对比度灵敏度。

1. 采样间隔控制

理论上采样间隔控制应按采样定理处理。对于数字射线检测技术，图像数字化的采样间隔由探测器（系统）的有效像素尺寸决定，因此对于实际检测工作，可按检测工作要求的检测图像不清晰度处理。前面章节的理论中已经给出，检测图像不清晰度的表示式为（按执行的标准采用的形式）

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt[3]{[\phi(M-1)]^3 + (2P_e)^3}$$

或（欧洲标准与 ISO 标准）

$$U_{\text{im}} = \frac{1}{M} \sqrt{[\phi(M-1)]^2 + (2P_e)^2}$$

依据这些关系式，可按照数字射线检测技术系统射线源焦点尺寸、可采用的放大倍数，确定对于某一检测工作必需的探测器（系统）的有效像素尺寸。在简单处理时，可用辐射探测器的像素尺寸作为辐射探测器的有效像素尺寸。显然，这是在探测器系统选择时就必须解决的问题。

需要注意的是，这里出现的是探测器（系统）的有效像素尺寸，因此对于间接数字化射线检测技术，除了选择适宜性能的探测器，还必须选择适宜的后续图像数字化采样间隔。

*2. 量化位数控制（本段对Ⅱ级人员不要求）

量化位数由图像数字化的 A/D 转换位数决定。由于量化位数决定了检测图像的对比度灵敏度，因此对于一定缺陷检验要求，采用的数字化技术系统（或辐射探测器）的 A/D 转换位数必须满足要求。

量化位数的基本要求，是保证量化分辨率小于最小输入信号、量化最大值大于最大输入信号，量化的动态范围不小于输入信号的动态范围分贝（dB）值，使信号不失真，因此需要的最小 A/D 转换位数可由需要检测信号的动态范围决定。即 A/D 转换位数的值 m (bit) 应不小于需要检测信号的动态范围的值（dB）。

由于 A/D 转换器的动态范围为（两个电压比）

$$20\lg\left(\frac{2V_m}{\Delta}\right) = 20\lg(2^m) = 6m(\text{dB})$$

式中 V_m ——最大输入信号（ $-V_m \sim V_m$ ）；

Δ ——量化间隔。

因此应要求此动态范围不小于检测输入信号的动态范围：

$$6m \geq \text{检测输入信号的动态范围}(\text{dB}) \quad (4-14)$$

例如，当检测信号的变化范围达到 $10^4:1$ 时，因有

$$\text{动态范围} = 20\lg 10^4 = 80\text{dB}$$

应要求 A/D 转换位数 m 为

$$\begin{aligned} 6m &\geq 80 \\ m &= \frac{80}{6} \approx 13.3(\text{bit}) \end{aligned}$$

实际应取不小于 14bit。

*3. 分贝的概念

声强的变化范围很大，数量级可以相差很多，这样用通常的数字表示和运算声强将不方便。另一方面，人耳对声音响度的感觉也近似与声强的对数成正比，因此采用对数表示两个声强之比，此值称为贝尔（B）。例如 I_1/I_2 的贝尔值为 $\lg(I_1/I_2)$ 。实用中常用贝尔值的 1/10 作为单位，称为分贝，记为 dB，这样两个声

强的比为

声强比(dB) = 10lg(I1/I2)

由于，声强与声压间为平方关系

I = P^2 / (2ρv)

式中 P——声压；
ρ——介质密度；
v——声速。
所以两个声压的比应为

声压比(dB) = 20lg(P1/P2)

4.4.2 图像显示与观察条件

数字射线检测技术多数是在显示器屏幕上观察图像，为能够正确可靠地识别图像中的信息，必须控制图像显示条件。

1. 图像显示视觉基础

关于视觉理论的研究指出，人眼的灰度分辨力（亮度分辨力），即眼睛对亮度细微变化的识别能力与亮度相关。表4-5 给出了可识别的亮度对比度与亮度的关系，表中L为照明亮度，ΔL/L为可识别的亮度对比度（阈值对比度）。图4-12 显示了阈值对比度随背景亮度的变化。可见，为提高眼睛的灰度分辨力，必须控制背景亮度处于适当范围。

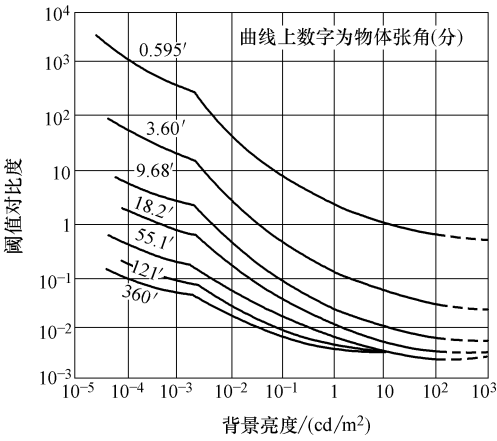


图 4-12 阈值对比度随背景亮度的变化

表 4-5 可识别的亮度对比度与亮度的关系

L/(cd/m ²)	ΔL/L	L/(cd/m ²)	ΔL/L	L/(cd/m ²)	ΔL/L
6366	0.0266	25.5	0.0178	0.25	0.0380
1273	0.0191	12.7	0.0175	0.13	0.0455
636.6	0.0170	6.4	0.0188	0.06	0.0560
254.6	0.0172	2.5	0.0217	0.03	0.0860

在视觉理论研究中，人眼的视觉锐度定义为人眼可分辨的两点对人眼所张视角的倒数。

V = 1 / α

式中 α ——所张视角。

如果 α 的单位为 ($'$)，则 V 值称为视力。视力与环境亮度相关，图 4-13 显示了二者的关系。从图 4-13 可见，视力随亮度增大而增加，当亮度超过 1000cd/m^2 时，视力不再有明显增加。视力也就是人眼的空间分辨率，对静止图像，从人眼的结构，一般为 $1'$ 。

对于数字射线检测技术的图像识别，这些构成了图像主要视觉基础，从它们可提出图像显示条件的控制方面与要求。

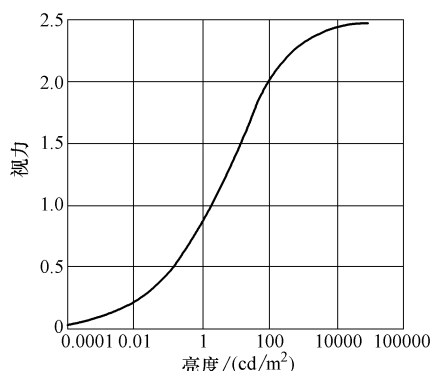


图 4-13 视力与亮度的关系

2. 显示器的基本性能

图像显示条件主要是关于显示器性能的要求。显示器不影响获得的数字图像的分辨率，但它影响图像的显示效果，因此它的性能直接影响评定人员对图像的观察和识别。

显示器的基本性能包括亮度、分辨率、显示亮度比、灰度级、响应时间等。

1) 亮度指显示屏可达到的最大亮度。

2) 分辨率是指显示屏能够显示的像素点多少。显示器的分辨率以水平像素数乘以垂直像素数的方式给出。例如，显示器的分辨率写成：800 像素 × 600 像素（并常应包括其像素的尺寸大小），则是它的水平方向为 800 像素、垂直方向为 600 像素。显示器本身具有一个最高的分辨率，它可以兼容其他较低的分辨率。对于具有一定分辨率的显示器，其每单位面积都显示相同的像素数。

3) 显示亮度比（也称为对比度）指显示屏可显示的最大亮度与最小亮度之比。

4) 灰度级是可量化的灰度的最大级数。

5) 响应时间是信号随时间变化时，显示图像随时间改变的特性。

3. 显示器性能与观察条件的基本要求

对显示器性能的基本要求，从数字射线检测技术图像的质量和图像视觉基础考虑，最关心的是前面四个主要性能。不同技术标准可能做出不同的规定，一种典型的显示器主要性能要求如下。

1) 亮度： $\geq 250\text{cd/m}^2$ ；

2) 分辨率： ≥ 1280 像素 × 1024 像素（像素尺寸为 $150 \sim 300\mu\text{m}$ ）；

3) 灰度级： ≥ 256 ；

4) 显示亮度比： $\geq 100:1$ ；

5) 软件：可提供目视可见的 256 级别灰度。

关于观察条件的技术要求，显然应是从视觉特性提出，主要包括亮度适应性要求、视场亮度要求、观察距离要求、观察室条件等。由于观察的也是亮度对比度图

像，因此与胶片射线照相技术的评片技术要求基本相同。

4.4.3 数字图像处理技术

在数字射线检测技术中，为了更好地识别图像中的信息，在观察和评定图像时通常都要运用数字图像处理技术。

数字图像处理技术可分为三个层次内容：狭义图像处理、图像分析、图像理解。狭义图像处理是对输入图像进行某种变换，改善图像的视觉效果或对图像进行压缩编码等，获得输出图像。图像分析是对图像的局部（目标）进行检测与测量，建立图像目标的描述，给出图像数值或符号描述。图像理解是在图像分析基础上，基于人工智能等研究图像目标的性质和目标间的相互关系，对图像内容理解和解释。

我们这里简要叙述的数字射线检测技术中运用的数字图像处理内容，主要是狭义图像处理，也可说是图像增强处理内容。简单说，图像增强处理主要是根据图像质量的一般性质，选择性地加强图像的某些信息、抑制另一些信息，改善图像质量。图像增强处理不会增加图像的信息量，但可使某些图像特征容易识别或检测。

从射线检测技术对图像增强处理希望得到的结果，可以把常用的数字图像增强处理方法分为对比度增强、图像锐化、图像平滑三类处理，此外，还可包括伪彩色处理。表 4-6 是常用图像增强处理的类别与方法。

表 4-6 常用图像增强处理的类别与方法

增强处理方法类别	常用处理方法
对比度增强	直方图调整，灰度变换法，直方图均衡化（局部统计方法）
图像锐化	高通滤波法，微分（梯度）法
图像平滑	低通滤波法，中值滤波法（局部平均法），多帧平均法

1. 对比度增强处理

（1）直方图调整 当整幅图像对比度较小、整幅图像偏暗时，可采用直方图调整处理。即对图像整体的亮暗分布进行统计，做出其灰度直方图，通过对灰度直方图分析，做出调整处理。灰度直方图是图像灰度级分布的函数，表示图像中具有不同灰度级的像素个数，反映图像中不同灰度级出现的频率。任何一幅图像，都可以确定其对应的灰度直方图，图像情况不同其灰度直方图不同，从该图可以判断图像的某些特性。

直方图调整处理就是采用变换函数，调整灰度级分布，使图像灰度间距拉开或分布均匀，或突出所关心的灰度级范围。调整图像的灰度直方图，则可改变图像的特性。图 4-14 是一个灰度直方图调整处理实例。

（2）灰度变换法 对图像上各个像素点的灰度值，采用适当的变换函数，把输入灰度范围变换为输出灰度范围，这就是灰度变换法处理。变换函数可以是线性

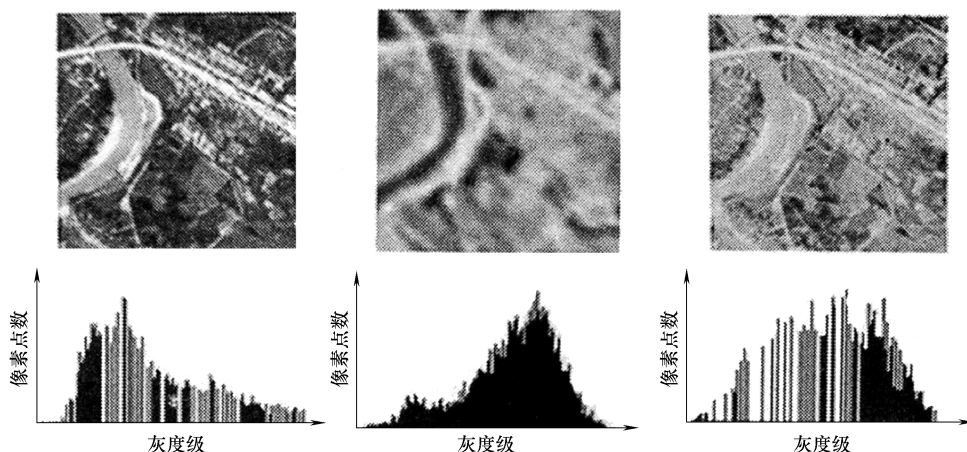


图 4-14 灰度直方图调整处理对比图（下面图为对应的灰度直方图）

函数、非线性函数（如幂函数、对数函数等），可以分段采用不同的变换函数，以获得希望的结果。图 4-15a 是一分段线性变换函数示意图（一般称为对比拉伸变换处理）。从图中可见，对于中间段（ ab 区）灰度级图像对比度将获得明显增大。在变换后，灰度直方图将同时改变。

（3）直方图均衡化（局部统计方法） 当图像中某灰度值的像素数比例很大时，对图像的影响也将很大。反之，若某灰度值的像素数比例很小时，则其对图像的影响也将很小。从此出发，对图像中像素数比例很大的灰度值展宽，对图像中像素数比例很小的灰度值合并，这种处理就是直方图均衡化。例如，一种处理是依据图像灰度级局部的均值和方差，对每个像素的灰度级分配一新的局部的均值和方差，提高对比度。图 4-15b 为直方图均衡化处理的图像与原图像对比。



图 4-15 直方图调整

a) 分段线性变换函数示意图 b) 直方图均衡化处理（左为原图像）

2. 图像锐化处理

（1）高通滤波法 图像轮廓与图像中的急剧变化区对应的是空间高频分量，

因此在空间频率域采用高通滤波处理，可以锐化图像轮廓与图像急剧变化区边缘，使图像清晰。可以构成不同的高通滤波函数，完成高通滤波处理。例如，一种高通滤波函数（称为理想高通滤波器）是对低于一定频率（截止频率）的部分均置为0（其傅里叶变换的传递函数均置为0），对高于该频率部分均无损失地（其傅里叶变换的传递函数置为1）通过。图4-16是一图像高通滤波处理的情况。



图4-16 高通滤波处理（左为原图像）

（2）微分（梯度）法 微分运算是求变化率（斜率、梯度）的运算，因此微分处理结果与图像点的变化情况密切相关。对于图像轮廓及其中的突然变化区，微分处理后将增大图像的变化幅度，使图像轮廓、变化区边缘得到增强。实际微分处理时，可以按图像的不同方向或其组合等进行，这样就形成了不同的微分处理（微分算子），获得不同的处理结果。图4-17是一微分法处理图像的情况。

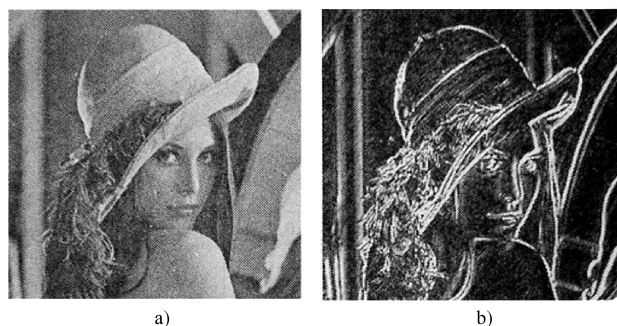


图4-17 微分法处理图像对比（左为原图像）

3. 图像平滑处理

图像平滑处理的目的是消除噪声。噪声有不同来源，特征不同。例如，频谱均匀分布的噪声称为白噪声，幅值基本相同、出现位置随机的噪声称为椒盐噪声等。图像平滑处理的主要方法是低通滤波法、中值滤波法、多帧平均法。

（1）低通滤波法 图像噪声的灰度值改变迅速，从空间频率角度，处于高频

部分，因此通过低通滤波法可以降低图像噪声。低通滤波法可以采用低通滤波函数实现。不同低通滤波函数特点不同，去除含在空间高频分量中的图像噪声特点不同。

(2) 中值滤波法（局部平均法） 中值滤波法是采用一个像素邻域内各点的灰度级的平均值（或中间值），代替该像素的灰度级，降低噪声的方法。中值滤波法处理时需要选择中值滤波器窗口（即局部平均区的形状、大小），不同形状窗口处理效果不同。常用窗口形状有线状、十字状、正方形状等。最佳窗口很难事先选定。中值滤波处理对脉冲状噪声、点状噪声具有很好的去除效果，图 4-18 是一中值滤波法去除椒盐噪声图例。

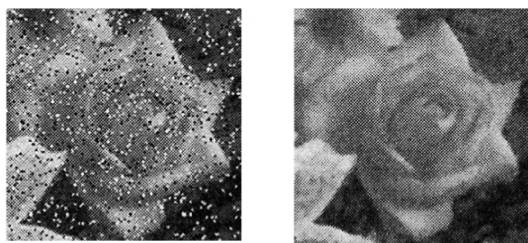


图 4-18 中值滤波法去除椒盐噪声图例（左为含噪声图像）

(3) 多帧平均法 当图像噪声为加性噪声，即噪声对于坐标点互不相关，且平均值为零，则可采用多帧平均法处理。多帧平均法（多图像平均法）常称为积分处理，其采用多幅图像叠加以削弱噪声。在应用时，必须使多幅图像的像素准确对应叠加。

4. 伪彩色处理

一般认为，人眼可分辨的不同色彩可达千种以上，但对于从黑到白仅可分辨 20 多个灰度级，因此在灰度图像中，当不同细节的灰度值相差较小时，人眼不能识别。但若将灰度值变换为不同颜色，则可能被人眼识别。伪彩色处理就是将灰度图像的各像素，按其灰度值以一定规则赋予对应的不同颜色，将灰度图像转换为彩色图像。

可以采用不同的方法实现伪彩色处理。例如，最简单的是将 0 ~ 255 这 256 个灰度级，对应成 256 种色彩，就可以简单地将灰度图像转换为彩色图像。

这些数字图像处理方法，汇集在图像观察与评定系统的软件中。不同的数字射线检测技术系统可能提供不同功能的软件，使用条件也会存在差异。此外，软件应包括缺陷尺寸电子测量功能，以便正确地测定缺陷尺寸。为了更好地识别图像中的信息，在观察和评定图像时通常都要运用数字图像处理技术。

为正确地运用这些软件，获得满意的图像质量，正确地完成缺陷评定，显然，数字射线检测技术要求检测人员应掌握一定的计算机操作技能。

4.4.4 缺陷识别与质量级别评定

在数字射线检测图像上,识别缺陷与进行质量级别评定,在基本知识方面与胶片射线照相检测技术相同。

正确地识别检测图像上的影像,判断影像所代表的缺陷性质,需要丰富的实践经验和一定的材料和工艺方面的知识,从而掌握主要的缺陷类型、缺陷形态、缺陷产生规律;必须理解射线检测影像形成的规律和特点,从而掌握缺陷影像在检测图像上显示的规律和特点。它们为分析影像的形成和缺陷影像可能发生的变化提供了基础。缺陷影像识别不是一个纯理论问题,需要经验的积累。

在上述基础上,判断缺陷影像的性质,一般地说,可以从影像的几何形状、影像的灰度分布和影像的位置三个方面进行分析:

1) 不同性质的缺陷具有不同的几何形状和空间分布特点,由于检测图像上缺陷的影像是缺陷的几何形状按照一定规律在平面上投影形成的图形,因此检测图像上缺陷影像的形状与缺陷的几何形状密切相关。在分析影像的几何形状时应当考虑单个或局部影像的基本形状、多个或整体影像的分布形状、影像轮廓线的特点。应注意的是,对于不同的透照方式,同一缺陷在检测图像上形成的影像的几何形状可能发生变化。

2) 影像的灰度分布是判断影像性质的另一个重要依据。不同性质的缺陷内在性质不同,因此不同性质缺陷对射线的吸收不同,形成的缺陷影像灰度也就不同。在分析影像灰度特点时应考虑影像灰度相对于工件本体灰度的高低、影像自身各部分灰度的分布特点。

3) 缺陷影像在检测图像上的位置,也就是缺陷在工件中位置的反映,这是判断影像缺陷性质的另一个依据。缺陷在工件中出现的位置常具有一定的规律,因此影像所在的位置也与缺陷性质相关。某些性质的缺陷只能出现在工件的特定位置,对这类性质的缺陷,影像的位置将是识别缺陷的重要依据。

实际识别检测图像上影像的缺陷性质,是从上述三个方面进行综合考虑,做出判断。熟悉材料与工艺的主要缺陷,显然是识别缺陷影像的基本理论知识。这方面积累得越多、理解得越深刻,越可能正确地识别检测图像上的缺陷性质。

质量级别评定是按照工件验收标准(技术条件)的规定对工件质量级别做出评定的过程。一般说,质量级别评定工作可分为四步:

- 1) 准备:主要是充分理解和掌握质量验收标准;
- 2) 整理数据:对从检测图像得到的缺陷数据进行归纳、分析;
- 3) 分级评定:依据质量验收标准的规定对工件的质量级别进行评定;
- 4) 结论:依据质量分级的结果对工件质量进行评价。

深刻地理解质量验收标准的规定,是正确完成质量级别评定的基础。

对于射线检测,关心的是验收标准关于内部缺陷的规定。验收标准关于内部质

量的规定，一般都包括三方面的内容，即缺陷类型、缺陷数据测定和质量分级具体规定。

1) 缺陷类型是质量验收标准依据缺陷对工件结构、性能的影响，进行的重新归纳、分类，规定质量分级时采用的缺陷类型。这时的缺陷类型可以不同于缺陷实际的性质。

2) 缺陷数据测定方法是质量验收标准关于质量级别评定时缺陷的尺寸、数量等测定方法的规定。进行质量级别评定时，必须按照质量验收标准的规定，确定相关缺陷数据。

3) 质量分级具体规定是质量验收标准关于质量级别的缺陷性质、数量、分布、位置允许性的规定。对其中涉及的概念、术语意义必须正确理解，否则不可能做出正确评定结论。

在进行质量级别评定前，应对质量验收标准的这些规定进行深入和全面的理解。

在数字射线检测图像的缺陷识别与质量级别评定时，常可运用数字图像处理软件，对检测图像进行适当处理、测量，这有助于正确、快速识别和评定检测图像影像。

对于数字射线检测图像上缺陷的识别与质量级别评定，需要注意的方面，除了胶片射线照相检测技术中指出的，检测图像上缺陷影像可能存在影像的投影重叠、影像畸变（得到的影像的形状与在射线投影方向截面的形状不相似）和一定程度的放大外，必须注意的是检测图像空间分辨率对缺陷影像的影响。特别是那些质量级

别评定涉及缺陷影像形貌特点的缺陷。例如，常见的铝合金铸造针孔缺陷，其影像形貌与评定的质量级别密切相关，而其在检测图像上显示的影像形貌又与检测图像空间分辨率密切相关。图 4-19 显示的是同一铝合金针孔缺陷在不同空间分辨率检测图像上给出的影像。若对它们进行质量级别评定，空间分辨率低的检测图像的质量级别将明显不同于空间分辨率高的检测图像。

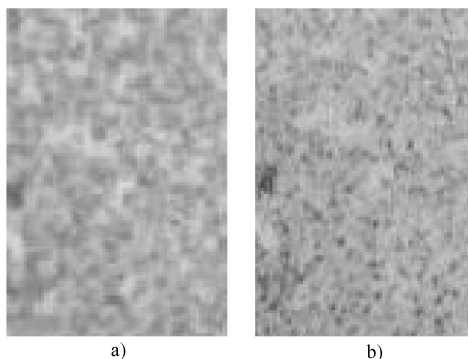


图 4-19 空间分辨率对缺陷形貌显示的影响

a) 空间分辨率较低 b) 空间分辨率较高

* 4.4.5 尺寸测量

本节讨论的是要求以一定误差限制时的尺寸测量问题。

1. 尺寸测量概念

对于数字射线检测技术，尺寸测量是在获得的检测图像上完成某个细节（缺

陷或关注对象)的尺寸测量。这种尺寸测量,本质上是以检测图像像素尺寸为单位的测量。也就是,测量得到的尺寸,实际是细节的图像占据的像素数乘以像素尺寸得到的数值,即

$$D = NP$$

式中 D ——测量得到的细节尺寸;

P ——检测图像的像素尺寸;

N ——在检测图像上细节图像的测量值(以像素尺寸为单位)。

为实现尺寸测量,必须确定检测图像的像素尺寸 P 和在检测图像上细节以像素尺寸为单位的测定值 N 。

由于获得的检测图像是数字图像,对细节尺寸的测量必然是以像素尺寸为单位,因此像素尺寸决定了可实现的最小测量误差,图 4-20 显示了这种情况。一般可认为,这时测量的最大误差将是像素尺寸的 $1/2$ 。即

$$\Delta_{\max} = \frac{1}{2}P$$

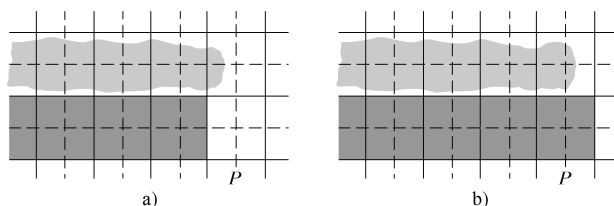


图 4-20 数字图像像素尺寸引起的测量误差

为了满足细节尺寸测量误差要求,必须控制检测图像的像素尺寸,因此当要求细节尺寸测量误差为 Δ 时,为满足该测量误差要求,严格时应要求 $P \leq \Delta$ 或者 $U_{\text{im}} \leq 2\Delta$ 。一般情况下可要求 $P \leq 2\Delta$ 或者 $U_{\text{im}} \leq 4\Delta$ 。

实际的测量误差还与细节图像测定值 N 的误差、校准确定的检测图像像素尺寸误差相关。也与采用的计算方法相关。

2. 细节图像测定值 N 的测量方法

由于检测图像存在不清晰度(或理论上成像的卷积特性),不清晰度必然影响图像上的细节图像尺寸。图 4-21 显示了不清晰度对图像上细节图像尺寸的影响。概括这种影响,对于(长度较大)宽度尺寸为 D 的细节,当检测图像不清晰度为 U_{im} 时,可以给出细节图像宽度断面的最小宽度和最大宽度值。

1) 当细节宽度尺寸不小于不清晰度时,最小宽度值为 $(D - U_{\text{im}})$; 最大宽度值为 $(D + U_{\text{im}})$ 。

2) 当细节宽度尺寸小于不清晰度时,最小宽度值为 $(U_{\text{im}} - D)$; 最大宽度值为 $(D + U_{\text{im}})$ 。

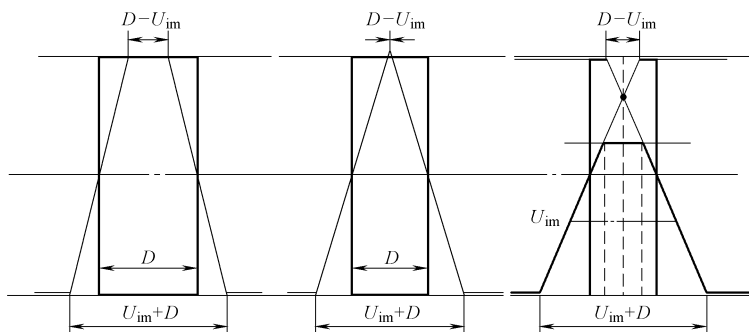


图 4-21 不清晰度对图像上细节图像尺寸的影响

考虑到这种影响,在细节尺寸测量时一般采用“半高宽法”。即通过软件画出细节图像断面的幅度分布曲线,以峰值高度的 1/2 宽度作为测定细节尺寸的基本数据。从图 4-21 可以清楚看到:

- 1) 对当细节宽度尺寸不小于不清晰度时,该数据可直接作为细节尺寸数据;
- 2) 对当细节尺寸小于不清晰度时,该数据可作为不清晰度数据 U_{im} ,为确定细节尺寸还应测定细节图像断面的全宽度数据 $(U_{im} + D)$,以二者差确定细节尺寸。

实际应用这种方法处理时还应注意的是,检测图像测量值总会存在误差,因此应取多次测量值的平均值进行计算。这包括在检测图像上对细节图像、校准试块图像的测量。

3. 图像像素尺寸校准确定方法

理论上检测图像的像素尺寸可按关系式

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt{[\phi(M-1)]^2 + (2SR_b)^2}$$

或

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt[3]{[\phi(M-1)]^3 + (2SR_b)^3}$$

计算,但由于实际检测情况并不是理想的情况,因此在实际测量过程中一般采用校准试块确定检测图像像素尺寸。

确定检测图像像素尺寸的校准试块,一般采用与被检验材料相同的材料制作。校准试块尺寸与被检验细节尺寸接近(适当小些或适当大些),制作成适当厚度的锐利边界。一般应与被检验物体同时检验,从获得的检测图像测定校准试块尺寸对应的像素数,按下式计算校准的检测图像像素尺寸

$$P_0 = \frac{L_0}{N_0}$$

式中 L_0 ——标准试块尺寸；

N_0 ——标准试块尺寸在检测图像上测定的像素数；

P_0 ——校准获得的检测图像的像素尺寸。

如果令 $y = L$, $x = N$, $k = P$, 显然上述关系应是 $y = kx$ 方程决定的直线关系。

理论上可用一点数据与坐标原点数据或用二点数据确定上面的直线方程。从此也就可给出两种校准方法：单校准试块像素尺寸校准确定方法和双校准试块像素尺寸校准确定方法。

单校准试块像素尺寸校准确定方法，是采用一块校准试块的校准像素尺寸确定方法。按上面叙述，可写

$$P_{01} = \frac{L_1}{N_1}$$

双校准试块像素尺寸校准确定方法，要采用两块校准试块，一块的尺寸小于被测细节尺寸，另一块的尺寸大于被测细节尺寸。按上面叙述，其校准获得的检测图像的像素尺寸为

$$P_{02} = \frac{L_2 - L_1}{N_2 - N_1}$$

如果考虑到可能出现的误差，比较准确的是采用多个数据（多个校准试块）完成校准过程，然后用最小二乘法进行线性回归，求出校准后的检测图像像素尺寸。图 4-22 显示了这个情况，这时获得的检测图像像素尺寸误差会小，或说给出的直线近似与真实情况接近。

实际检测中的尺寸测量，多用单校准试块像素尺寸校准确定方法和双校准试块像素尺寸校准确定方法。

4. 细节尺寸计算方法与讨论

从检测图像测定了某细节的像素值 N 后，其对应的细节尺寸 L 可按不同方法计算。

- 1) 校准计算方法：即采用单校准试块校准像素尺寸，按下式计算

$$L = NP_{01}$$

- 2) 线性插入计算方法：即采用双校准试块校准像素尺寸，按下式计算

$$L = L_1 + (N - N_1)P_{02}$$

或

$$L = L_2 - (N_2 - N)P_{02}$$

式中，下标中出现“2”的为尺寸大的校准试块的相应值。

两种校准方法引出的两种计算方法的区别在于，单校准试块的计算方法构建线

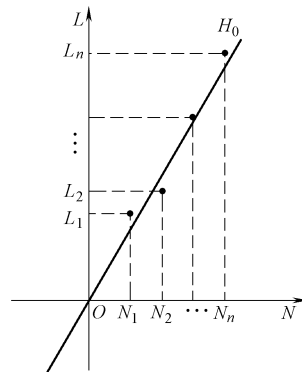


图 4-22 理想的多点校准

性关系时,采用的是 $y = kx$ 方程关系。双校准试块的计算方法构建线性关系时,一般都会是 $y = kx + b$ 方程关系。由于必然存在误差,方程中的截距一般不等于0。图4-23 具体显示了两种校准方法的区别及其与理想的多点校准的关系。

图中, A 、 B 直线为单校准试块构建的线性关系, 而直线 H 为双校准试块构建的线性关系, H_0 直线为多校准试块构建的理想线性关系。

校准计算方法是按图中直线 A 方程 (或按直线 B 方程) 的计算方法, 因此其计算结果将包含多次累计像素尺寸误差。

线性插入计算方法是按图中直线 H 方程的计算方法。由于两校准试块尺寸设计为适当覆盖被测量细节尺寸 (一个校准试块尺寸比被测量细节尺寸小些, 一个校准试块尺寸比被测量细节尺寸大些), 这就决定了, 在两校准试块数据点之间的测量值, 与多点校准直线的偏差会小于单校准试块直线的偏差。也就是减少了测量误差。从图中, 容易对此做出证明。

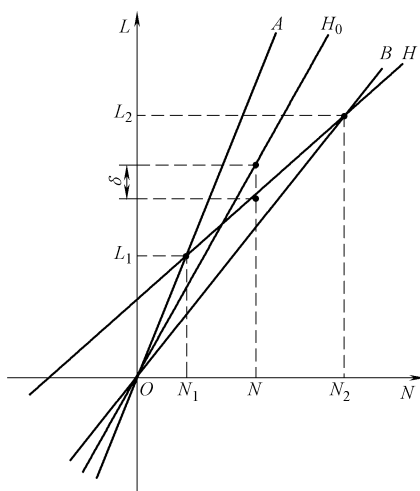


图 4-23 两种校准方法的区别

5. 不同校准计算方法误差比较

由于获得的检测图像是数字图像, 采用校准试块校准获得的像素尺寸一般都存在误差。不同校准方法的像素尺寸误差也会不同, 计算结果误差也会不同。

例如, 细节尺寸 $L = 2.64\text{mm}$, 校准试块 1 尺寸 $L_1 = 2.37\text{mm}$, 校准试块 2 尺寸 $L_2 = 2.82\text{mm}$ 。表 4-7 给出了像素尺寸、校准方法对细节尺寸测量的影响。它显示了检测图像不清晰度、像素尺寸校准方法、计算方法对细节尺寸测量结果的影响。若测量最大误差限制为 $\Delta = 0.05\text{mm}$, 则从表 4-7 给出的结果可见, 检测图像不清晰度不大于 0.2mm 才能满足要求。

表 4-7 像素尺寸、校准方法对细节尺寸测量的影响 (不放大的检测布置)

U_{im}/mm	图像测定值 N			细节尺寸 L 计算值/mm			
	细节	校准试块 1	校准试块 2	用校准试块 1 计算	用校准试块 2 计算	线性插入计算	用理论像素尺寸计算
0.5	11	9	11	2.89	2.82	2.82	2.75
0.2	26	24	28	2.57	2.62	2.59	2.60
0.15	35	32	38	2.59	2.60	2.59	2.62
0.1	53	47	56	2.67	2.67	2.67	2.65
0.05	106	95	113	2.64	2.64	2.64	2.65

* 4.4.6 厚度测定

厚度测定问题可分为两种情况，一是某部位厚度差测定；二是工件部位由两种不同材料物体构成，需要测定各部分（不同材料物体）的厚度。

1. 厚度差测定方法

厚度差测定是在某技术检测时，工件检测图像上两邻近部位的灰度值分别为 G_1 和 G_2 ，确定它们对应的厚度差 ΔT 。

按照基本理论的叙述，当厚度差 ΔT 很小时，对应的图像亮度对比度为

$$\frac{\Delta L}{L} = -\frac{\mu \Delta T}{1+n}$$

由于灰度是眼睛对亮度的感觉，可认为就是亮度，因此上式可写为

$$\frac{\Delta G}{G} = -\frac{\mu \Delta T}{1+n}$$

从此可写出

$$\Delta T = -\frac{(1+n)\Delta G}{\mu G}$$

此式用于 ΔG 很小的情况（ $\Delta G \approx 0$ ），即应转换为微分情况

$$dT = \left(-\frac{1+n}{\mu}\right) \frac{dG}{G}$$

对特定的工件区、特定的检测技术，因 μ 、 n 都是定值，故可记为常数

$$C = -\frac{1+n}{\mu}$$

这样就有

$$\Delta T = \int_{G_1}^{G_2} C \frac{dG}{G}$$

由于函数 $\frac{1}{x}$ 的原函数为 $\ln x$ ，故上积分结果为

$$\Delta T = C \ln G \Big|_{G_1}^{G_2}$$

即

$$\Delta T = C \ln \left(\frac{G_2}{G_1} \right)$$

为从灰度差确定厚度差，需要确定检测技术的常数值 C 。常数值 C 可从理论上确定，但一般可简单地采用试块确定。按上式有

$$C = \frac{\Delta T}{\ln(G_2/G_1)}$$

即，可在测量部位附加同样材料、具有适当平面尺寸的小厚度差试块，从检测图像的灰度值确定常数值 C 。这样对一定范围内的厚度差都可以测定。

例如, 对适当尺寸的厚度为 2mm、4mm、6mm 的平板, 在获取的检测图像上测定的灰度值分别为 41000、33000、26000。设厚度 4mm 为未知厚度, 用厚度 2mm、6mm 作为试块确定需要的常数

$$C = (6 - 2) \times \ln\left(\frac{26000}{41000}\right) \approx -8.7820$$

从它可确定未知厚度 (这里为 4mm) 与厚度 2mm、6mm 的厚度差。与厚度 2mm 的厚度差为

$$\Delta T = -8.7820 \times \ln\left(\frac{33000}{41000}\right) \approx 1.9026(\text{mm})$$

与厚度 6mm 的厚度差为

$$\Delta T = -8.7820 \times \ln\left(\frac{33000}{26000}\right) \approx -2.0937(\text{mm})$$

可见, 这样测定的误差可控制在较小范围。

2. 两种不同物体结构的厚度测定原理

对于工件结构为两种不同物体 (例如, 管道的保温层与本体结构) 构成的厚度测定, 需要采用双能射线检测技术。双能射线检测技术是用高、低两种不同能量的射线透照工件。双能射线检测技术测定工件两种不同材料物体厚度的原理如下。

假定工件结构的两种物体厚度分别为 T_1 和 T_2 , 采用的 X 射线的能量分别为 E_1 和 E_2 , 两种物体对不同能量射线的衰减系数分别为 $\mu_1(E)$ 和 $\mu_2(E)$, 入射射线强度为 I_0 , 透射射线强度为 I 。依据射线的衰减规律, 则可写出两次透照的透射强度方程

$$I(E_1) = I_0(E_1) e^{-\mu_1(E_1)T_1 - \mu_2(E_1)T_2}$$

$$I(E_2) = I_0(E_2) e^{-\mu_1(E_2)T_1 - \mu_2(E_2)T_2}$$

对二式分别改写为

$$\ln\left(\frac{I_0(E_1)}{I(E_1)}\right) = \mu_1(E_1)T_1 + \mu_2(E_1)T_2$$

$$\ln\left(\frac{I_0(E_2)}{I(E_2)}\right) = \mu_1(E_2)T_1 + \mu_2(E_2)T_2$$

从而可求得:

$$T_1 = \frac{\ln[I_0(E_1)/I(E_1)]\mu_2(E_2) - \ln[I_0(E_2)/I(E_2)]\mu_2(E_1)}{\mu_1(E_1)\mu_2(E_2) - \mu_1(E_2)\mu_2(E_1)}$$

$$T_2 = \frac{\ln[I_0(E_1)/I(E_1)]\mu_1(E_2) - \ln[I_0(E_2)/I(E_2)]\mu_1(E_1)}{\mu_1(E_2)\mu_2(E_1) - \mu_1(E_1)\mu_2(E_2)}$$

即, 只要确定了工件两种物体的射线衰减系数, 测定了两次透照时测定部位的射线透射比, 则可按上面两式计算出工件两种物体的厚度。

方程有解的条件是

$$\frac{\mu_1(E_1)}{\mu_1(E_2)} - \frac{\mu_2(E_1)}{\mu_2(E_2)} \neq 0$$

因此应正确地选取二次透照的射线能量。

4.5 数字射线检测图像质量控制

4.5.1 检测图像质量指标控制

对于数字射线检测技术获得的图像质量，由于采用辐射探测器实现射线信号的探测和转换，而辐射探测器的性能（空间分辨率）不能简单地由技术因素确定；由于引入了图像数字化技术获得数字化的检测图像，测定图像质量必须同时测定对比度和空间分辨率（不清晰度）。按照目前数字射线检测技术标准的规定，对数字检测图像质量，主要采用两项指标控制，即对比度和不清晰度（空间分辨率）。表4-8是ISO 17636-2：2013标准的部分规定值。

评价检测图像的对比度，一般采用常规像质计灵敏度。即采用胶片射线照相检验技术中使用的像质计，测定数字图像的对比度，监测数字射线检测成像获得的图像对比度。

测定检测图像的不清晰度（空间分辨率）一般采用双丝像质计。测定直接给出检测图像不清晰度值

$$U_{im} = 2d$$

式中 d ——双丝型像质计测定时，不能区分成丝对的各对丝中直径最大的丝对的丝直径。

按照图像不清晰度值与线对值的关系，则可给出另一个表示空间分辨率的空间频率线对值

$$R_{im} = \frac{1}{2d}$$

表 4-8 ISO 17636-2：2013 标准图像质量的部分规定值

对比度	线型像质计测定值	W19	W18	W17	W16	W15
	A 级厚度段/mm	—	≤1.2	1.2~2.0	2.0~3.5	3.5~5.0
	B 级厚度段/mm	≤1.5	1.5~2.5	2.5~4	4~6	6~8
不清晰度	双丝型像质计测定值	D13	D12	D11	D10	D9
	A 级厚度段/mm	≤1.0	1.0~1.5	1.5~2	2~5	5~10
	B 级厚度段/mm	1.5~4	4~8	8~12	12~40	40~120

* 4.5.2 图像质量的补偿原则

1. 补偿原则提出的理论基础

按照射线检测技术一般理论，检测图像的清晰度对小细节的对比度的影响一般写成

$$C = C_0 \frac{W}{U}$$

式中 W ——细节图像宽度；

U ——检测图像清晰度；

C_0 ——清晰度为 0 时细节图像的对比度；

C ——实际的细节检测图像对比度。

对于某检测图像，原要求对比度与清晰度关系为：

$$C_1 = C_0 \frac{W}{U_1}$$

当清晰度 U_1 增大为 U_2 时，细节图像对比度将降低为

$$C_2 = C_0 \frac{W}{U_2}$$

为使 $C_2 = C_1$ ，就必须提高这时的 C_0 值。如果 $U_2 = kU_1$ ，则就应要求这时的 C_0 值也提高 k 倍。即

$$C_2 = kC_0 \frac{W}{U_2} = kC_0 \frac{W}{kU_1} = C_0 \frac{W}{U_1} = C_1$$

即通过提高细节对比度可以补偿清晰度增大引起的对比度灵敏度损失。由于单丝像质计和双丝像质计的金属丝设计采用的是同样的等比数列，这样就可以采用提高单丝像质计值补偿双丝像质计值作为补偿规则。

实现对比度提高的基本技术措施是提高信噪比，所基于的理论关系是前面章节给出的射线检测技术的对比度噪声比与信噪比的关系。

2. 补偿规则规定

按照上面的讨论，可形成射线检测技术的补偿规则。对于数字射线检测技术补偿规则可简单概括成：如果对于使用的探测器系统和曝光条件，检测图像质量指标的双丝像质计值未达到规定值，可通过增加常规单丝像质计值或阶梯孔像质计值，补偿超出的清晰度值引起的对比度损失。在 ISO 17636-2: 2013 标准中，关于补偿规则的具体规定内容可写成以下三条。

1) 1 级补偿：单丝像质计值提高 1 级来补偿双丝像质计值降低 1 级。如要求 D12/W16 未同时达到，则 D11/W17 可提供等价检验灵敏度要求。

2) 2 级补偿：补偿限制在单丝像质计值最多提高 2 级来补偿双丝像质计值降低 2 级。

3) 3 级补偿：对特定检验，在保证缺陷灵敏度的条件下，经过合同各方同意，

可放松到单丝像质计值提高3级来补偿双丝像质计值降低3级。

3. 补偿规则使用

必须注意的是,补偿规则是通过提高信噪比保证达到充分的对比度灵敏度,并不补偿不清晰度降低,也就是并不是保证全面达到了原规定的检测图像质量,因此应用补偿规则必须注意要求检验的缺陷特点,确定是否可应用补偿规则和可应用的补偿规则级数。

国外一些重要标准已经明确指出,缺陷检验在理论上至少包括识别缺陷和分辨缺陷两个方面。例如,ASTM E1441-00标准第8.5.3条就指出,缺陷仅是可检出往往是不够的,缺陷检验应该包括的是可检出、可分辨(detected and resolved)。这就要求检测图像必须同时达到要求的对比度和不清晰度指标。正因如此,美国材料试验学会的DDA检测技术标准(ASTM E2698-10)明确规定(第10.19.2.3条),如果使用的数字射线检测技术系统,不能获得规定的检测图像的不清晰度要求,该数字射线检测技术系统不适宜应用于检验工作;在ISO17636-2:2013标准中,对检测图像质量的要求(附录B)也同时规定了检测图像的对比度和不清晰度要求。

从实际考虑,缺陷检验至少应包括三方面:显示存在的缺陷、正确显示缺陷尺寸、正确显示缺陷形貌。全面运用这三方面数据才能正确做出质量级别评定。在应用补偿规则时必须注意降低不清晰度要求影响的程度是否会导致错误的质量级别评定。所以在确定可应用的补偿规则范围时,必须依据工件的材料、工艺、缺陷特点,必须依据工件的技术条件规定。当缺陷形貌、准确的缺陷尺寸是质量级别评定的关键方面时,应慎重考虑补偿规则应用的范围。

* 4.6 数字射线检测技术级别近似设计

* 4.6.1 概述

数字射线检测技术设计解决的问题是,对于技术条件或验收标准规定的缺陷检验要求,设计满足要求的数字射线检测技术。

完整的数字射线检测技术设计,应包括检测技术系统选择、检测技术控制、检测图像质量要求三方面设计。实际的检测技术设计,是从检测图像质量要求设计开始,以此进一步完成检测技术系统选择、检测技术控制的设计。如果存在符合要求的检测技术标准与相应的技术级别,则可指定应采用的检测技术标准与相应的技术级别,而无须后续的详细设计。

数字射线检测技术级别设计的基本内容是检测图像质量(指标)设计。设计的检测图像质量的基本要求是,给出满足技术条件或验收标准规定的缺陷检验要求。

缺陷检验的完整意义,应包括正确显示缺陷尺寸、分布和形貌,依据它们可正

确做出工件质量级别的评定。这就要求，不允许存在的缺陷必须能检验出来，而允许存在的缺陷也不能显示成不允许存在的缺陷。也就是，能够正确识别和分辨缺陷。按照射线检测技术理论，这要求检测图像质量必须同时控制对比度和不清晰度指标。即检测图像必须同时设计常规像质计灵敏度和双丝像质计的不清晰度（空间分辨率）指标。前者控制最小尺寸缺陷的检验（识别）能力，后者控制分辨最小尺寸缺陷的能力。

由此形成的数字射线检测技术级别设计的基本过程是：

1) 按照常规胶片射线照相检测技术理论，对于规定的检验缺陷要求，设计必须满足常规像质计灵敏度指标。

2) 从得到的常规像质计灵敏度值，按数字射线检测技术采样理论，设计检测图像应满足的双丝像质计（空间分辨率）指标。

从数字射线检测技术级别设计角度考虑，后面将讨论的等价技术级别评定问题，可认为是一特殊的数字射线检测技术级别设计问题。即，它是要求设计与胶片射线照相检测技术级别具有同等缺陷检验能力的数字射线检测技术级别。

* 4.6.2 检测图像常规像质计指标设计

检测图像常规像质计灵敏度指标设计，可利用胶片射线照相检测技术建立的细节（缺陷）图像与常规像质计图像显示之间的关系进行。运用它们可完成一般缺陷检验的常规像质计指标设计。下面给出的是可使用的主要的关系式。

1. 气孔与线型像质计可识别性关系式

$$\frac{\pi}{4} F d_Q^4 = d^3 l$$

式中 d ——线型像质计可识别最细金属丝直径，单位为 mm；

l ——线型像质计金属丝有效长度（7.6mm）；

d_Q ——球孔（或气孔）直径，单位为 mm；

F ——形状因子， $F=0.79$ 。

此关系式一直列在 ASTM E747 标准的附录中。当孔径与板厚相等时，转化为线型像质计与阶梯孔型像质计的可识别性换算关系。

2. 未焊透、裂纹可检验性与线型像质计可识别性关系式

利用矩形缝细节的可识别性公式与丝形细节可识别性公式，可给出未焊透、裂纹缺陷可检验性与线型像质计灵敏度的关系。

对于未焊透缺陷，一般可假设 $\theta=0$ ，则有近似关系式

$$\frac{lW}{W+U} = \frac{\pi d^2}{4(U+d)}$$

对于裂纹，常用的一种简单情况是： $\theta=0$ 、 $W \ll U$ ，这时上式可进一步近似为

$$lW = \frac{0.8d^2}{(1 + d/U)}$$

式中 d ——可识别的线型像质计金属丝最细直径；
 U ——射线照相技术总的不清晰度；
 l ——矩形缝深度方向的高度（未焊透深度）；
 W ——矩形缝的宽度（未焊透间隙宽度）。

对裂纹应用时应注意的是：此式仅适用于延伸方向与射线透照方向相同的裂纹，式中的 W 应取为矩形缝的 $1/2$ ，近似自然裂纹的开裂断面形状。矩形缝各参数的意义如图 4-24 所示。

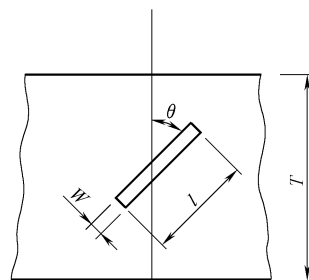


图 4-24 矩形缝各参数的意义

3. 线型像质计与平板孔型像质计的可识别性关系式

$$F^3 d^3 l = \frac{\pi}{4} T^2 H^2$$

这里所用的 T 、 H 分别代表平板孔型像质计的板厚度和孔直径。

设计时，首先选定需要使用的缺陷显示与常规像质计显示的关系式，然后依据缺陷尺寸计算出应识别的常规像质计细节尺寸。对计算得到的常规像质计细节尺寸，一般需要进行数据的规范处理，即将计算得到的数据转换为技术标准规定的数值。从保证缺陷检验角度，一般都是转换为最接近、更严格要求的数据，以这个数据作为缺陷检验技术要求的数据。这样，就确定了需要的检测图像常规像质计指标。

* 4.6.3 检测图像不清晰度（空间分辨率）指标设计

关于双丝像质计不清晰度指标，严格的设计需要依据成像过程理论按缺陷检验需要的调制传递函数值完成设计，可参阅文献。这里仅讨论近似的简单设计方法。

1. 采样定理要求的关系式

为分辨细节所需要的检测图像不清晰度指标的基本关系式，按照采样定理

$$f_s \geq 2f_m$$

$$f_s = \frac{1}{U_{im}}$$

$$f_m = \frac{1}{2d}$$

式中 U_{im} ——检测图像不清晰度（mm）；

d ——检测图像应识别的线型像质计丝直径尺寸（mm）。

因此有

$$U_{im} \leq d$$

2. 瑞利判据要求的关系式

在实际中,对于很小细节分辨设计常采用瑞利判据。因采用双丝像质计测定检测图像不清晰度的依据的就是瑞利判据

$$U_{im} = 2d$$

式中 d ——确定不清晰度的丝对的丝直径。

因此若将 d 设为检测图像应识别的线型像质计丝直径尺寸 (mm),则可确定检测图像必须达到的不清晰度要求。应注意的是,这时细节实际是处于刚进入不可分辨的状态,同时细节的对比度峰值将降低为初始值的 1/2。对此,若按采样频率角度考虑,瑞利判据给出的实际是 $f_s = f_m$ 。

3. 缺陷像素覆盖设计方法

从像素采样考虑,探测器的空间分辨率决定了图像细节的可检验性,因此选择探测器的空间分辨率是选择检验系统的重要方面。从图像对比度和空间分辨率考虑,对于某个检验问题,基于期望检验的缺陷最小尺寸、物体对比度、信噪比、DDA 像素尺寸,可给出下面的 DDA 选择考虑。

- 1) 用 1 个像素覆盖期望检验的缺陷尺寸,高风险,不推荐;
- 2) 用 2~3 个像素覆盖期望检验的缺陷尺寸,中等风险,可具有高信噪比、对比度;
- 3) 用 4~6 个像素覆盖期望检验的缺陷尺寸,低风险;
- 4) 用多于 6 个像素覆盖期望检验的缺陷尺寸,如可实现,是最好的处理。

从缺陷可检验性和坏像素情况,只要可能一般希望用不少于 3 个像素覆盖期望检验的缺陷尺寸。

按照 ASTM E2736-10 标准的上述规定,可从要求检验的缺陷直接设计需要的双丝像质计指标。设计基于的关系式是

$$P_e = SR_b$$

$$U_D = 2SR_b = 2P_e$$

这样,从设计的覆盖缺陷的像素数可确定双丝像质计测定的不清晰度值。这种设计与前面叙述的按采样定理的设计存在对应关系。

4. 实际的不清晰度控制设计方法

概括上面的讨论可以看到采样频率对细节分辨能力的影响,图 4-25 是一基本结果。从该图可概括出,当采样频率等于或大于 2 倍细节对应的空间频率时,细节处于对比度峰值保持不降低的可分辨状况;当采样频率小于 2 倍细节对应的空间频率,但大于 1 倍细节对应的空间频率时,细节处于对比度峰值降低的可分辨状况;当采样频率等于或小于 1 倍细节对应的空间频率时,细节将进入对比度峰值降低不可分辨状况。因此为分辨细节,采样频率不能小于 1 倍细节对应的空间频率,希望大于 2 倍细节对应的空间频率;可能时,希望采样频率能等于 5 倍细节对应的空间频率。

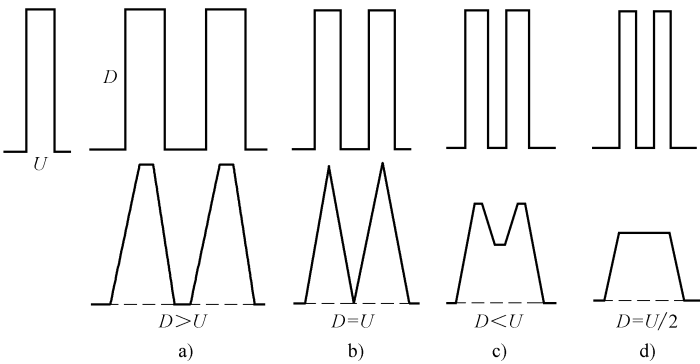


图 4-25 采样频率对细节图像分辨的影响（下行为细节图像）
a) $f_s > 2f_m$ b) $f_s = 2f_m$ c) $f_s < 2f_m$ d) $f_s = f_m$

基于上面的讨论，可完成检测图像不清晰度或双丝像质计测定值指标设计。设计的基本处理是：以前面设计的常规像质计灵敏度确定的应识别最小丝直径 d ，构成检测图像需要分辨的最高空间频率；以瑞利判据作为最低控制要求；以采样定理控制作为标准要求；以工业应用的 3 ~ 5 倍采样频率作为更高要求，进行检测图像不清晰度或双丝像质计测定值指标设计。

图 4-26 显示的是，ISO 17636-2: 2013 标准按上述考虑的双丝像质计测定值指标设计分析，它是与胶片具有等价缺陷检验能力的检测图像不清晰度设计。图 4-26 对应的数据见表 4-9，标准的这个处理可作为处理实际问题的基本参考。从这些数据可看到，对小缺陷检验（要求识别很小直径丝）难于按采样定理控制，只能接受瑞利判据作为最低控制要求。对于较大缺陷检验（要求识别较大直径丝），应采用比采样定理更严格的控制。甚至希望采用 $f_s \geq 5f_m$ 控制，即 $U_{im}/d \leq 0.4$ 的控制。

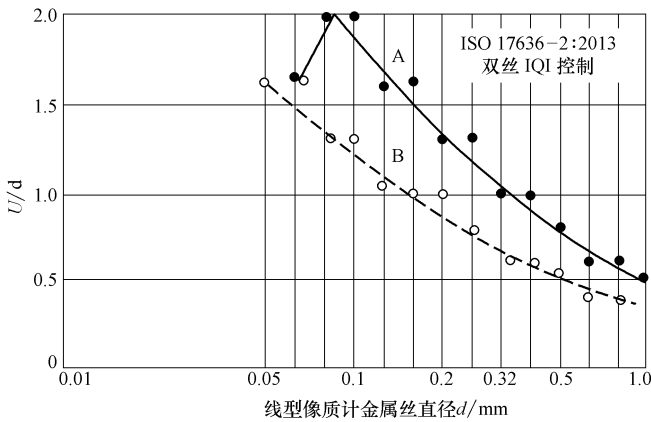


图 4-26 双丝像质计测定值指标设计参考图

表 4-9 双丝像质计测定值指标设计分析

d/mm		0.063	0.080	0.100	0.125	0.16	0.20	0.25	0.32	0.40	0.50	0.63
A	U/d	1.6	2.0	2.0	1.6	1.6	1.3	1.3	1.0	1.0	0.8	0.6
	f_s/f_m	1.25	1	1	1.25	1.25	1.54	1.54	2	2	2.5	2.5
B	U/d	1.6	1.3	1.3	1.0	1.0	1.0	0.8	0.6	0.6	0.5	0.4
	f_s/f_m	1.25	1.54	1.54	2	2	2	2.5	3.33	3.33	4	5

* 4.6.4 例题

[例 1] 气孔检验技术级别设计

某焊接件，板厚 20mm，双面焊对接接头，技术条件要求气孔的尺寸不应超过 0.7mm。设计实现该气孔检验的数字射线检测技术的检测图像质量指标。

解：

(1) 确定必须达到的线型像质计灵敏度 从气孔可检验性与线型像质计灵敏度关系式

$$\frac{\pi}{4} F d_Q^4 = d^3 l$$

可得到，应识别的线型像质计最细金属丝直径为

$$d = d_Q \times \sqrt[3]{\left(\frac{\pi F d_Q}{4l}\right)}$$

代入有关数据，得到 $d = 0.27\text{mm}$ 。

(2) 直径数值规范化 所求得的直径值不属于线型像质计金属丝直径值系列，为保证检验结果可靠性，对其规范化，采用 $d = 0.25\text{mm}$ 。

(3) 按 $f_s = 2.4f_m$ (一般常用此关系) 确定需要的不清晰度 从关系式

$$f_s = \frac{1}{U_{\text{im}}}, f_m = \frac{1}{2d}$$

则有

$$\frac{1}{U_{\text{im}}} = 2.4 \times \frac{1}{2d}$$

代入数据得到

$$U_{\text{im}} = \frac{d}{1.2} = 0.2083\text{mm}$$

(4) 对计算的不清晰度值规范 取为 $U_{\text{im}} = 0.20\text{mm}$ 。

(5) 检测图像质量指标应设计

1) 常规线型像质计：像质值 W12 = 0.25mm。

2) 双丝像质计: 测定值 $D10 = 0.20\text{mm}$ 。

从上面设计的检测图像质量指标, 可见 ISO 17636-2: 2013 标准的 B 级技术满足要求。即可以采用该标准的 B 级技术完成检验。

[例 2] 未焊透检验技术级别设计

某钢焊接件, 板厚 20mm , 双面焊对接接头, 技术条件要求未焊透的尺寸不超过 2 (深度) $\text{mm} \times 0.015$ (宽度) mm 的未焊透。设计实现该未焊透检验的数字射线检测技术的检测图像质量指标。

解:

(1) 设计依据的基本关系式

$$lW = \frac{0.8d^2}{(1 + d/U)}$$

由于关系式中出现了不清晰度, 因此需要同时考虑双丝像质计不清晰度指标。对双丝像质计不清晰度采用 $f_s = 2.4f_m$ 进行设计。因有

$$\frac{f_s}{f_m} = \frac{1/U_{im}}{1/2d} = \frac{2d}{U_{im}}$$

则

$$\frac{d}{U_{im}} = \frac{f_s}{2f_m}$$

(2) 按上面关系式, 确定线型像质计指标

$$d = \sqrt{\frac{(1 + d/U_{im})lW}{0.8}} = \sqrt{\frac{(1 + f_s/2f_m)lW}{0.8}}$$

代入数据, 计算得到 $d = 0.2872\text{mm}$ 。

为保证检验结果, 规范化为

$$d = 0.25\text{mm}$$

(3) 按规范后的线型像质计指标确定双丝像质计不清晰度指标

$$U_{im} = \frac{1}{f_s/f_m} \times 2d = \frac{2}{2.4}d \approx 0.2083\text{mm}$$

规范为

$$U_{im} = 0.20\text{mm}$$

(4) 检测图像质量指标应设计为

1) 常规线型像质计: 像质值 $W12 = 0.25\text{mm}$ 。

2) 双丝像质计: 测定值 $D10 = 0.20\text{mm}$ 。

从上面设计的检测图像质量指标可见, ISO 17636-2: 2013 标准的 B 级技术满足要求。即可以采用该标准的 B 级技术完成检验。

为保证未焊透图像的对比度和实现较高的分辨能力, 对双丝像质计不清晰度可采用 $f_s = 3f_m$, 得到

$$U_{im} = \frac{2}{3}d \approx 0.1666\text{mm}$$

规范为

$$U_{im} = 0.16\text{mm}$$

这样可以获得对比度更高、更清晰的未焊透图像。

* 4.7 数字射线检测技术稳定性控制

* 4.7.1 概述

为保证数字射线检验结果能够可靠地重复，必须保证检测技术系统处于稳定受控状态。为此，需要采取的主要措施是编制检验工艺文件、进行检测系统性能长期稳定性试验。编制的检验工艺文件、检测系统性能长期稳定性试验文件，应成为检验机构的检测系统或质量保证程序的一部分。

* 4.7.2 检验工艺文件（检验程序文件）

检验工艺文件，或称为检验程序文件，其主要检验技术部分内容应编制成检验工艺卡。检验工艺文件（检验程序文件）其主要内容应包括下列项目。

- 1) NDT 机构名称、地址、日期、程序版本。
- 2) 检验使用的探测器类型和制造厂。像质计类型和尺寸，如果使用替代的像质计，它们的设计细节或标准应出现在文件中。
- 3) 工件材料类型和厚度范围。要求的质量级别和检验区达到的最低质量级别。
- 4) 透照布置（射线源、工件、像质计位置）的图样或照片，所使用的射线束角度、SDD（源到探测器距离）、ODD（工件到探测器距离）、几何放大倍数。屏蔽物体、垫块材料和厚度。
- 5) 透照（图像采集）参数：X 射线曝光应给出电压、电流、滤波、帧平均、射线束或探测器准直、有效焦点尺寸； γ 射线源曝光应给出源类型、源活度、曝光时间、帧平均、射线束或探测器准直、源尺寸。
- 6) 自动系统的扫描面控制。
- 7) 评定技术主要要求：观察图像的窗口宽度和水平；所使用的图像处理参数，包括降噪方法、对比度增强、滤波处理等。
- 8) 验收准则。验收准则可从程序分离出来，但应文件化，且评定图像人员应可得到。
- 9) 证实系统符合检验要求方法的文件。
- 10) 检验工艺卡给出的内容主要是：检验时机、曝光区、识别标记规定、像

质计类型和使用、透照布置、透照（图像采集）参数、图像处理参数等。

若检验程序对许多工件类似，主书面程序应覆盖共同的细节要求。全部书面程序文件应由责任 RT-Ⅲ人员批准。

* 4.7.3 检测系统性能的长期稳定性试验控制

必须注意的是，在使用寿命期中数字射线检测系统的性能可能发生变化，甚至超出检验应用性能限制的要求，因此必须进行检测系统性能长期稳定性试验控制。包括：定期性能核查试验；系统修理、更换、更新软件后（系统改变）的特定性能测定试验。通过这些性能测定试验，决定系统是否应退出检验工作。

为了评定系统性能的稳定性，在系统投入检验工作时，应测定系统的初始性能数据，并依据检验对象的特定要求，设置出允许的性能变化限制数据，作为以后评定系统性能是否符合检验要求的依据。

对分立辐射探测器构成的数字射线检测系统（DDA 系统），表 4-10 概括了长期稳定性试验项目。对于 IP 板构成的数字射线检测系统（CR 系统），表 4-11 概括了性能测定试验项目。具体试验可参考相关标准或制造厂推荐的方法。定期性能核查试验的周期，应考虑系统使用情况与客户共同确定。

试验所使用的技术参数（射线、透照等）程序等，应是用于工件检验的技术和程序。这些应用技术和程序应由执行无损检测的机构给出，并编写成书面文件程序，执行它们应能稳定给出所要求的检验结果和质量级别。一般说，它应得到客户的同意。

表 4-10 DDA 系统的性能测定长期稳定性试验项目

系统性能试验		基本 数据 试验	系统改变试验			定期核查试验	
参数	单位		软件 升级	X 线管更换	DDA 改变/ 修理	短时间	长时间
空间分辨率 <i>SR</i>	μm	○		○	○	○	○
信噪比 <i>SNR</i>	—	○	○	○	○	○	○
对比度灵敏度 <i>CS</i>	%	○	○	○	○	○	○
材料厚度范围 <i>MTR</i>	mm	○	○	○	○	○	○
信号水平 <i>SL</i>	—	○	○	—	○	○	○
成像拖尾	%	○	—	—	○	—	○
老化（bunn-in） <i>BI</i>	%	○	—	—	○	—	○
偏置水平	—	○	○	○	○	—	○
坏像素分布	—	○	○	○	○	○	○

表 4-11 CR 系统性能测定试验项目

试 验 类 别	具体试验项目	评 定 性 能
系统性能	基本空间分辨率	系统空间分辨率的稳定性
	规格化信噪比	系统信噪比的稳定性
	对比度灵敏度	系统对比度灵敏度特性的稳定性
扫描读出单元性能	几何畸变	评定扫描的非线性程度
	激光束功能	评定扫描激光束稳定性
	浮散或闪烁	评定读出单元转换均匀性
	滑动	评定输送系统的稳定性等
	暗影	扫描束宽度方向均匀性等
IP 板性能	衰退特性	确定曝光与读出间隔时间的改变
	擦除	擦除后残留图像程度
	人为缺陷	IP 板人为产生的缺陷

* 4.7.4 检测工艺卡编制

检测工艺文件的主要检测技术内容，即检测时机、曝光区、识别标记规定、像质计类型和使用、透照布置、透照参数（包括图像采集参数）、图像处理参数等，应编制成检测工艺卡，图 4-27 是一个可参考的设计样式。

编制工艺卡需要处理的主要问题是下列方面。

1. 技术级别设计

当产品（工件）技术条件明确指定了检测技术标准和检测技术级别时，应执行技术条件的规定。当产品（工件）技术条件未做出相关规定时（这应是实际的一般情况），应分析产品（工件）技术条件的缺陷检验要求，设计需要达到的检测图像质量要求，选择适宜的检测技术标准和检测技术级别。具体处理应按 4.6 节技术级别近似设计的内容进行。

2. 探测器系统性能设计

显然，并不是任何一个数字射线检测系统都可以满足任何检验要求，因此在确定了检测技术级别后，需要设计满足检测技术级别的探测器系统性能。主要是设计探测器系统的基本空间分辨率（或像素尺寸）和规格化信噪比。具体过程应按 4.2 节探测器系统选择的内容进行。

需要注意的是，设计时，应考虑后续的实际检测技术，特别是与产品（工件）结构密切相关的可采用的透照方式及检测系统的射线源焦点尺寸。即实际设计应是结合实际检测技术的过程，而不是单纯的探测器系统本身性能设计。

3. 具体技术设计

包括透照技术、图像采集技术、图像显示与观察技术等。一般说，此过程实际

转化为按执行的检测技术标准正确确定相关要求。需要独立于标准自行设计的是透照方式与图像质量的补偿规则要求。

确定透照方式是关键环节，其直接关系是否能够符合产品（工件）技术条件的缺陷检验要求，也直接决定了后续的透照参数设计等。图像质量补偿规则设计，基础是对产品（工件）技术条件的缺陷检验要求的正确理解。这些都要求编制人员除了掌握必须的数字射线检测技术基本理论外，还必须掌握一定的材料工艺缺陷知识，否则难以正确处理工艺编制技术设计问题。

数字射线检测技术工艺卡

编号：

1	工件名称			工件图号		
	工件材料与规格			工件加工工艺		
	检验方法标准/级别			验收技术条件		
2	X射线机型号			X射线机焦点尺寸		
	探测器类型与型号			像素尺寸与 A/D 位数		
3	透照方式			透照布置示意图		
	f/mm					
	b/mm					
	M（放大倍数）					
	工件厚度/mm					
	透照电压/kV					
	管电流/mA					
	曝光时间					
	IP 扫描参数					
	附加说明					
4	图像观察的主要增强处理方法		高通滤波	缩放	平滑	
5	图像质量		基本要求	线型 IQI		双丝 IQI
			补偿规定	线型 IQI		双丝 IQI
6	备注	1				
		2				
7	编制：		审核：		批准：	

图 4-27 检测工艺卡的设计样式

复习参考题

一、选择题（每题的四个选项中只有一个正确答案，请将正确答案的序号填在题末括号内）

1. 对于一项检测工作，下面列出的构成数字射线检测技术系统时，需要具体处理的主要技术方面中，错误的是（ ）

- A. 探测器系统选择
- B. 透照技术控制
- C. 图像数字化技术控制
- D. 显示与观察技术控制

2. 对于数字射线检测图像，缺陷影像的缺陷性质判断，下面列出的基本判断方面中，错误的是（ ）

- A. 影像的几何形状
- B. 影像的灰度分布
- C. 影像的尺寸大小
- D. 影像的位置

3. 采用非晶硅分立辐射探测器构成的数字射线检测系统，如果像素尺寸为 0.143mm，射线源焦点尺寸为 0.4mm。下面给出的最佳放大倍数值中，正确的是（ ）

- A. 1.6
- B. 2.4
- C. 3.2
- D. 4.0

4. 采用非晶硅分立辐射探测器构成的数字射线检测系统，如果像素尺寸为 0.143mm，射线源焦点尺寸为 0.4mm，透照的放大倍数为 1.6。下面给出的获得的数字图像可实现的最高空间分辨率线对值中，正确的是（ ）

- A. 6.0Lp/mm
- B. 4.8Lp/mm
- C. 4.0Lp/mm
- D. 3.2Lp/mm

5. 对于直接数字化射线检测技术，下面给出的控制图像数字化过程因素中，错误的是（ ）。

- A. 辐射探测器的像素尺寸
- B. 射线源焦点尺寸
- C. 透照布置放大倍数
- D. 散射线防护

6. 对于间接数字化射线检测技术，下面给出的控制图像数字化过程要求中，正确的是（ ）。

- A. 主要控制透照参数
- B. 主要控制辐射探测器选择
- C. 主要控制后续图像数字化过程
- D. 同时控制辐射探测器选择与后续图像数字化过程

7. 下面列出的控制数字射线检测图像质量要求中，正确的是（ ）。

- A. 只需要采用常规像质计测定检测图像的对比度
- B. 只需要采用双丝像质计测定检测图像的清晰度和（空间分辨率）
- C. 需要同时控制检测图像的对比度和清晰度和（空间分辨率）

- D. 一般只需采用线对卡测定检测图像的质量
8. 在常用的工业数字射线检测系统中, 与其他检测系统比较, 下面列出的采用 DDA 探测器系统获得的检测图像质量特点中, 正确的是 ()。
- A. 信噪比高, 对比度高 B. 信噪比低, 空间分辨率高
- C. 信噪比高, 对比度低 D. 信噪比低, 空间分辨率低
9. 关于数字射线检测图像的对比度, 下面列出的影响因素中, 存在错误的是 ()。
- A. 射线检测的物体对比度 B. 图像数字化采用的参数
- C. 观察图像的显示器尺寸 D. 数字图像的空间分辨率
10. 下面列出的影响数字检测系统基本空间分辨率的基本因素中, 正确的是 ()。
- A. 透照采用的射线能量 B. 透照布置的放大倍数
- C. 透照布置的散射线控制 D. 辐射探测器的像素尺寸

二、判断题 (正确的画√, 错误的画×)

1. 探测器系统选择, 主要是针对通常条件下采用的检测技术, 确定所选择探测器系统的基本空间分辨率和规格化信噪比。 ()
2. 对于数字射线检测技术, 获得的检测图像的空间分辨率, 与检测时透照布置采用的放大倍数相关。 ()
3. 当采用的焦点尺寸很小时, 即使对于一般的数字射线检测技术系统, 由于可采用的最佳放大倍数很大, 检测图像也可达到很高的空间分辨率。 ()
4. 图像数字化过程控制主要是图像数字化的采样间隔和图像数字化的量化位数。采样间隔直接决定了检测图像的空间分辨率, 量化位数直接决定了检测图像的对比度灵敏度。 ()
5. 图像数字化的量化位数由图像数字化的 A/D 转换位数决定。检测技术系统 (或辐射探测器) 的 A/D 转换位数必须满足要求, 才能保证小缺陷的检验灵敏度。 ()
6. 在观察数字射线检测图像时, 不需要严格控制观察条件与显示亮度。 ()
7. 图像增强处理主要是根据图像质量的一般性质, 选择性地加强图像的某些信息、抑制另一些信息, 改善图像质量。 ()
8. 直方图调整是采用变换函数, 调整灰度级分布, 使图像灰度间距拉开或分布均匀, 或突出所关心的灰度级范围的数字图像增强处理方法。 ()
9. 对于各种缺陷, 检测图像的空间分辨率不会影响缺陷的质量级别评定结果。 ()
10. 对数字检测图像质量, 必须同时采用对比度和不清晰度 (空间分辨率) 二

项指标控制。

()

三、计算题

1. 某用分立辐射探测器构成的数字射线检测技术系统，若辐射探测器的像素尺寸为 $200\mu\text{m}$ ，射线源焦点尺寸为 0.4mm ，求可采用的最佳放大倍数。
2. 若辐射探测器的像素尺寸为 $200\mu\text{m}$ ，射线源焦点尺寸为 0.6mm ，求在最佳放大倍数时检测图像不清晰度和空间分辨率的线对值。

四、问答题

1. 简述数字射线检测技术系统的构成。
2. 简述选择数字射线检测技术系统的基本考虑。
3. 简述控制数字射线检测技术稳定性的方法。
4. 简述数字射线检测技术级别近似设计的基本过程。

第5章

工业常用数字射线检测系统

说明：本章内容基本是以Ⅱ级人员的要求编写。对于Ⅲ级人员仅增加个别小节内容。

5.1 概述

数字射线检测需要采用数字射线检测系统完成。一般地说，数字射线检测系统主要包括射线源、探测器系统、图像显示与存储处理单元、机械驱动装置系统（需要时）。图像显示与存储处理单元包括显示器、存储器、计算机和软件。

射线源的能量决定了检测系统适用的材料与厚度范围。射线源的焦点尺寸与探测器（系统）的基本空间分辨率，共同决定了可采用的透照布置放大倍数，这影响获得的检测图像空间分辨率。探测器（系统）的特性主要是基本空间分辨率和规格化信噪比（产生信号与噪声的特性），它们直接关系到数字射线检测系统获得的检测图像的对比度、空间分辨率和信噪比。为了采集、显示、存储、测量、处理图像，探测器系统和图像显示与存储处理单元必须与计算机硬件和软件同时工作。图像显示器的性能、计算机硬件和软件的性能，直接影响检测图像的显示和显示图像的质量改善。

软件必须具有数字射线检测技术需要的基本功能，这些功能要求包括采集、显示、存储、测量、处理等方面。对这些功能的具体要求是：采集图像时，软件应能按帧、帧叠加或帧平均从探测器（系统）采集图像，完成图像校正（校正探测器响应的不均匀性，确定和修正坏像素等）；显示图像时，软件应能调整图像（调整亮度、对比度，局部开窗调整）等；存储时，软件应能按照要求存储检测图像；图像测量和处理方面，包括给图像加标尺刻度、测定（并画出）目标区灰度分布轮廓线、统计窗（可完成目标区的平均值和标准差测量）、可完成直方图、降噪、对比度增强、滤波等处理。这些是检测系统正常工作必需的功能要求。

目前工业应用的数字射线检测系统主要是采用分立辐射探测器阵列（DDA）构成的直接数字化射线检测系统、采用IP板系统构成的间接数字化射线检测系统、

采用图像增强器系统构成的间接数字化射线检测系统、采用微焦点（几个微米或纳米级）射线源构成的数字射线检测系统和采用底片数字化扫描装置完成底片图像数字化的后数字化射线检测系统。

对于一定的检测工作，显然必须采用满足一定性能要求的数字射线检测系统。选择适宜检测工作的数字射线检测系统时，必须考虑数字射线检测系统的射线源的能量与焦点尺寸、探测器系统特性、图像显示与存储处理单元（包括计算机）的硬件和软件特性。

5.2 分立辐射探测器（DDA）数字射线检测系统

5.2.1 检测系统组成

采用分立辐射探测器阵列的直接数字化射线检测系统可分为两类。一类是面阵探测器数字射线检测系统，另一类是线阵探测器数字射线检测系统。

1. 面阵探测器数字射线检测系统

面阵探测器直接数字化射线检测系统的基本组成部分是：射线源、面阵探测器、图像显示与处理单元。图 5-1 是系统组成部分应用时的基本关系示意图。

面阵探测器常用的是非晶硅面阵探测器、CMOS 面阵探测器或非晶硒面阵探测器。探测器完成对射线的探测与转换，同时完成图像数字化，直接获得数字检测图像。常用的面阵探测器像素尺寸为 $200\mu\text{m}$ ，也有 $75\mu\text{m}$ 、 $127\mu\text{m}$ 、 $143\mu\text{m}$ 等，其 A/D 转换位数一般都可达到 12bit、14bit 或 16bit。显然，更小的像素尺寸、更高的 A/D 转换位数可以构成性能更好的数字射线检测系统。

面阵探测器直接数字化射线检测系统应用时，通常都采用静态检测方式获取检测信号。如果配备适当的机械装置和软件，这类系统也可以采用动态方式完成检测。

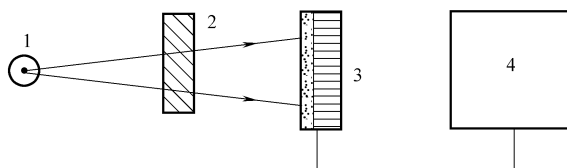


图 5-1 面阵探测器直接数字化射线检测系统示意图

1—射线源 2—工件
3—面阵探测器 4—图像显示与处理单元

2. 线阵探测器数字射线检测系统

线阵探测器直接数字化射线检测系统组成部分包括：射线源、线阵探测器、机械装置、图像显示与处理单元。图 5-2a 是检测系统各组成部分的基本关系示意图，

图 5-2b 是检测系统实际组成关系图。

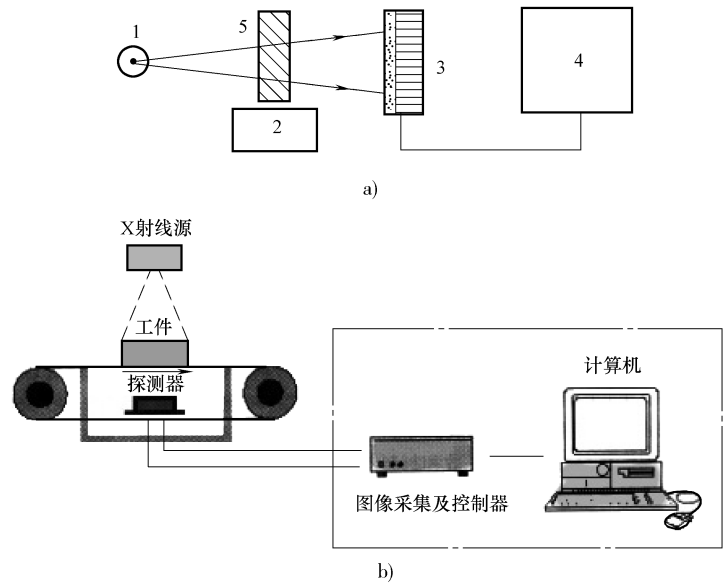


图 5-2 线阵探测器直接数字化射线检测系统示意图

a) 检测系统各组成部分的基本关系示意图 b) 检测系统实际组成关系图
1—射线源 2—机械装置 3—线阵探测器 4—图像显示与处理部分 5—工件

线阵探测器常用非晶硅或非晶硒分立辐射探测器，也可以是 CMOS 或 CCD 分立辐射探测器，个别也有分立气体辐射探测器。探测器完成射线的探测、转换，同时完成图像数字化。典型的像素尺寸有 $84\mu\text{m}$ 、 $127\mu\text{m}$ 等，其 A/D 转换位数，一般都可达到 12bit、14bit 或 16bit。

线阵探测器每次采集的仅是图像的一行数据，只能通过扫描方式完成一个部位检测图像采集，因此这种系统必须有机械装置，在机械装置的驱动下，随着工件与射线源（包括探测器）的相对运动，完成检验部位的图像采集。机械装置的运动构成了垂直于探测器方向的采样间隔。机械装置必须能够适宜固定工件，能以一定精度、平稳地完成平移和（或）旋转运动。显然，采用线阵探测器构成的系统，只能以动态检测方式获取检测图像。

在实际检测系统中，一般把射线源控制部分、机械装置控制部分和图像显示与处理部分组合在一起，附加上一些辅助设备（如摄像机、监视器等）和显示设备构成控制台，管理和操纵检测系统和检测操作。

***3. 系统组成控制（本段对Ⅱ级人员不要求）**

为获得要求达到的检测图像质量，必须选用性能满足要求的系统组成部分。从检测图像的清晰程度（空间分辨率）考虑，探测器阵列的像素尺寸、射线源的焦点尺寸必须满足要求。处理这个问题，可从检测图像清晰程度公式与最佳放大倍数

公式出发。下面以不清晰度关系式采用三次方为例，给出处理结果。

前面章节已经给出

$$U_{\text{im}} = \frac{1}{M} \sqrt[3]{[\phi(M-1)]^3 + U_{\text{D}}^3}$$

$$M_0 = 1 + \left(\frac{U_{\text{D}}}{\phi}\right)^{3/2}$$

$$U_{\text{D}} = 2P_e \approx 2P$$

利用这三个关系，可以简单求得对于一定检测图像不清晰度要求，需要采用的探测器阵列像素尺寸、射线源焦点尺寸。

在选用最佳放大倍数时，对于射线源焦点尺寸为 ϕ 时，利用上面关系容易得到

$$\left[\left(\frac{U_{\text{im}}}{\phi}\right)^3 - 1\right]U_{\text{D}}^3 + 2\left(\frac{U_{\text{im}}}{\sqrt{\phi}}\right)^3(\sqrt{U_{\text{D}}})^3 + U_{\text{im}}^3 = 0$$

将 $(\sqrt{U_{\text{D}}})^3$ 作为未知数，则此关系式是一元二次方程，解方程得到

$$U_{\text{Dmax}} = \left[\frac{\left(\frac{U_{\text{im}}}{\sqrt{\phi}}\right)^3 + U_{\text{im}}^{3/2}}{1 - \left(\frac{U_{\text{im}}}{\phi}\right)^3} \right]^{2/3}$$

进一步则得到可采用的最大探测器阵列像素尺寸为

$$P_{\text{emax}} = \frac{1}{2} \left[\frac{\left(\frac{U_{\text{im}}}{\sqrt{\phi}}\right)^3 + U_{\text{im}}^{3/2}}{1 - \left(\frac{U_{\text{im}}}{\phi}\right)^3} \right]^{2/3}$$

改写上面导出的关于 U_{D} 的关系式，将 $(\sqrt{\phi})^3$ 作为未知数，可得到下面的一元二次方程

$$(U_{\text{D}}U_{\text{im}})^3 \frac{1}{\phi^3} + 2(\sqrt{U_{\text{D}}}U_{\text{im}})^3 \frac{1}{\phi^{3/2}} + (U_{\text{im}}^3 - U_{\text{D}}^3) = 0$$

解此方程，可得到，在选用最佳放大倍数下，对探测器固有不清晰度为 U_{D} 时，可采用的最大射线源焦点尺寸为

$$\phi_{\text{max}} = \frac{U_{\text{D}}U_{\text{im}}}{[(U_{\text{D}})^{3/2} - (U_{\text{im}})^{3/2}]^{2/3}}$$

它们给出了对于要求的检测图像空间分辨率，在采用最佳放大倍数时，检测系统采用的射线源焦点尺寸、探测器像素尺寸（固有不清度）应满足的要求。

[例 1] 某检测系统，X 射线机焦点尺寸为 0.4mm，要求检测图像的空间分辨率达到 5.2Lp/mm。确定在最佳放大倍数时可采用的辐射探测器像素尺寸。

解：因 $R_{\text{im}} = 5.2\text{Lp/mm}$ ，则有

$$U_{\text{im}} = \frac{1}{R_{\text{im}}} = 1/5.2 \approx 0.1923 \text{ mm}$$

又因 $\phi = 0.4 \text{ mm}$ ，则可得到

$$U_{\text{D}} = 0.2520 \text{ mm}, P_e = 0.126 \text{ mm}$$

因此所选用的辐射探测器像素尺寸应为 $126 \mu\text{m}$ 。同时可得到检测系统理想情况下可采用的最佳放大倍数为

$$M_0 = 1 + \left(\frac{U_{\text{D}}}{\phi} \right)^{3/2} = 1 + \left(\frac{0.252}{0.4} \right)^{3/2} \approx 1.5$$

【例2】某检测系统，辐射探测器的像素尺寸为 $127 \mu\text{m}$ ，要求检测图像的空间分辨率达到 4.12 Lp/mm 。确定在最佳放大倍数时所允许使用的射线源焦点最大尺寸。

解：
$$U_{\text{D}} = 2 \times 0.127 \text{ mm} = 0.254 \text{ mm}$$

$$R_{\text{im}} = 4.12 \text{ Lp/mm}$$

$$U_{\text{im}} = 1/R_{\text{im}} = 0.2427 \text{ mm}$$

将数据代入焦点尺寸计算式，得到

$$\phi_{\text{max}} = 1.488 \text{ mm} \approx 1.5 \text{ mm}$$

透照应采用的最佳放大倍数则为

$$M_0 = 1 + \left(\frac{U_{\text{D}}}{\phi} \right)^{3/2} \approx 1.07$$

在不采用最佳放大倍数时，应以实际采用的放大倍数从开始的三个关系式进行计算。

5.2.2 DDA 检测系统的技术控制

1. 探测器响应校正

探测器响应校正是 DDA 检测系统技术控制的一个基本方面。

DDA 探测器的各个单元性能不可能完全一致，本底噪声可能不同，增益性能可能不同。这种性能差异可导致虚假检测信号，因此检测系统软件必须包括适当的探测器响应校正程序。通过探测器响应校正，使探测器各个单元可在一定限度内，对检测信号做出相同的响应。如果不进行探测器响应校正，几乎不能进行正常的检测工作。

探测器响应校正程序的质量，决定了可实现的校正效果。一般应测定（对检测工件材料、典型射线能量等条件下）探测器响应校正曲线，了解探测器响应校正程序的性能。

该曲线作用类似于胶片感光特性曲线，是正确设计检测技术曝光量参数的基本数据。

2. 透照参数

对于分立探测器阵列（DDA）数字射线检测系统，关于透照参数控制，主要是透照电压通常可选取一般标准限定值的上限（图 5-3），也可适当超过该上限值；

曝光量（管电流与积分时间的积，或管电流与帧速、叠加帧数）应保证检测图像达到较高的信噪比，可采用的最高曝光量决定于探测器的特性和探测器响应校正程序的效果。

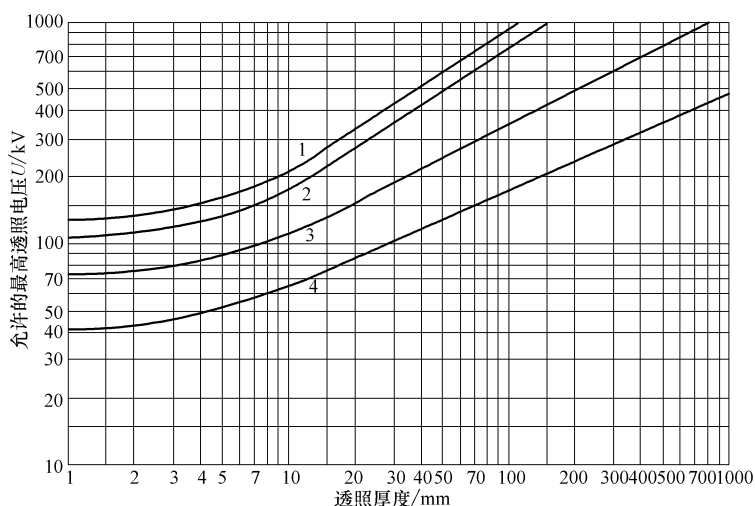


图 5-3 最高透照电压与透照材料、厚度关系
1—铜、镍合金 2—钢 3—钛及钛合金 4—铝及铝合金

3. 检测技术系统稳定性

DDA 探测器的性能，随着使用会发生改变，会出现新的坏像素，这些都可导致检测技术系统性能发生改变。为保证获得正确的检测结果图像，必须注意检测技术系统的稳定性控制。尽管各种射线检测技术都必须考虑这个问题，但与胶片射线照相检测技术比较，对于 DDA 探测器数字射线检测系统可能是更应考虑方面。

5.2.3 DDA 检测系统应用特点

一般地，DDA 探测器数字射线检测系统应用时，可获得具有很高对比度的检测图像，如果探测器像素尺寸较小，也可获得较高的空间分辨率，这为工业应用提供了基础。

与目前的各种射线检测技术比较，采用 DDA 探测器构成的数字射线检测系统获得的检测图像的信噪比，可远高于其他射线检测技术获得的检测图像信噪比。例如，通常 DDA 探测器响应校正后，数字射线检测系统的检测图像规格化信噪比可达到 500 以上，但胶片射线照相检测技术和 CR 技术的检测图像规格化信噪比达到 200 已经是很高的值。检测图像获得高信噪比的关键是良好的探测器响应校正。

由于检测图像信噪比直接与检测图像对比度灵敏度相关，因此 DDA 探测器数字射线检测系统的检测图像可获得远高于其他射线检测技术的对比度灵敏度。有研究给出，在检验孤立性缺陷方面，DDA 探测器数字射线检测系统的检测图像，具

有高于其他射线检测技术的检验能力。图 5-4 是该研究给出的厚度 8mm 钢采用 160kV 透照，DDA 探测器（200 μm 像素尺寸）数字射线检测系统获得的检测图像（经高通滤波）的线型像质计灵敏度，和采用 C1 类胶片射线照相获得的检测图像的线型像质计灵敏度比较。DDA 探测器检测图像可识别 W19（0.050mm）直径金属丝，而 C1 胶片检测图像只能识别 W16 ~ W17（0.100 ~ 0.084mm）直径金属丝。

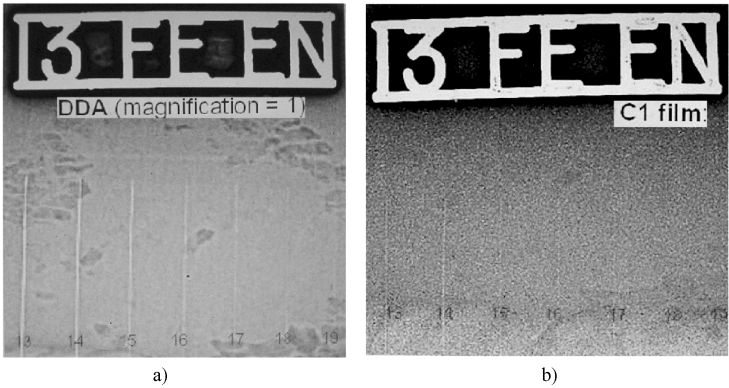


图 5-4 线型像质计灵敏度比较
a) DDA 探测器（200 μm ） b) C1 类胶片

需要指出的是，产生上面结果的主要原因在于 DDA 探测器检测图像具有很高的信噪比，另外原因是它的像素尺寸将被检验对象（金属丝直径）作了放大。即使是 W19（0.050mm）直径丝，其显示的尺寸也达到其像素尺寸 200 μm 的宽度。上述结果仅说明较大像素尺寸的探测器的检测图像可获得更高对比度灵敏度，并不能获得更好的空间分辨率。图 5-5 给出的是同一电阻点焊裂纹的 DDA 探测器

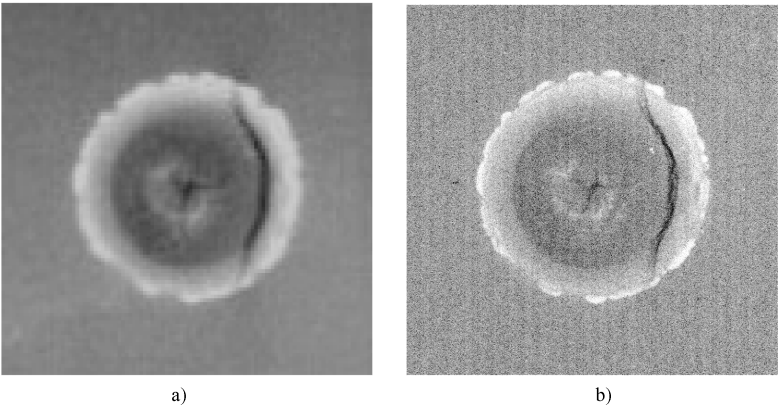


图 5-5 电阻点焊裂纹检测图像比较
a) DDA 探测器（200 μm ） b) C5（Kodak AA400）胶片

(200 μm 像素尺寸) 检测图像与 C5 类胶片 (kodak AA400) 检测图像的比较。可见, 由于 DDA 探测器像素尺寸较大, 裂纹的细节被模糊。

线阵探测器的像素尺寸常小于面阵探测器的像素尺寸, 另外, 线阵探测器直接数字化射线检测技术容易采用准直缝, 这能够有效地限制散射线, 使图像质量得到改善。但它要求所配置的机械扫描装置必须具有满足要求的性能。

5.3 IP 板间接数字化射线检测系统——CR 系统

5.3.1 检测系统组成与技术基本过程

采用 IP 板系统构成的间接数字化射线检测系统, 简称为 CR 系统, 由四部分组成: 射线源、IP 板、扫描器 (IP 板图像读出器) 和图像显示与处理单元。

这类数字化射线检测系统的检测过程可分为三步 (图 5-6): 透照、图像读出和评定。

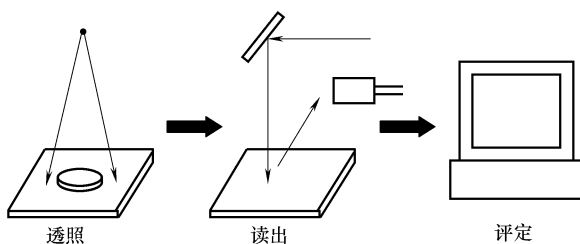


图 5-6 CR 系统技术检测过程

1) 透照: 采用 IP 板代替胶片, 按胶片射线照相检测技术控制的基本要求控制, 透照中 IP 板完成射线探测与转换, 在 IP 板中形成准稳态、潜在的检测信号图像。

2) 图像读出: 采用扫描器读出 IP 板上的信号图像, 完成图像数字化, 得到数字检测图像。

3) 评定: 在图像显示与处理单元对检测图像进行适当的图像处理、观察、作出图像信息的判断和质量级别评定。

图像读出是检测技术的一个特殊环节。即, 扫描器在读出软件控制下, 完成 IP 板信号图像的读出和数字化。图 5-7 给出了 IP 板图像读出的基本过程, 图 5-8 是一种扫描

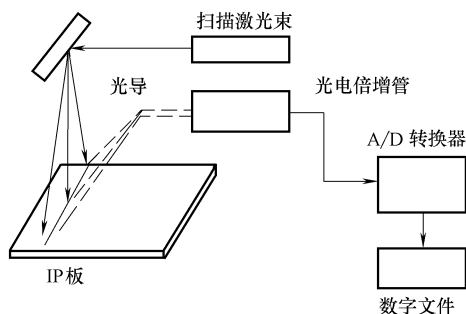


图 5-7 IP 板图像扫描读出过程

读出器的基本结构。扫描读出的基本过程是，IP 板图像读出器采用具有一定扫描点尺寸的（ $\lambda = 630\text{nm}$ ）的激光束，按照软件程序设定的扫描点尺寸（像素尺寸）和方式扫描 IP 板。在扫描时，630nm 的激光激发 IP 板，发射波长为 390nm 左右的荧光。产生的荧光经光导收集送入光电倍增器，经光电转换、放大，转换成模拟电信号，再经 A/D 转换形成数字图像文件，完成图像读出。得到的数字图像直接传送给图像显示与处理单元。

扫描读出时，激光扫描点尺寸（像素尺寸）、A/D 转换位数、扫描器本身的特性直接影响获得的数字图像质量的空间分辨率、对比度和信噪比。

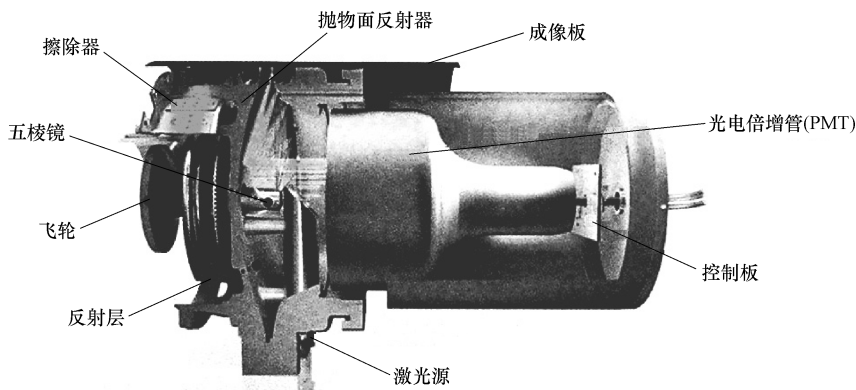


图 5-8 IP 板图像读出器基本结构

关于系统基本组成的要求，只要以 IP 板系统替代 DDA 探测器，可做出与分立辐射探测器检测系统相同的处理。

5.3.2 CR 系统的技术与应用特点

1. 透照技术

对于 CR 系统，透照参数的透照电压选取，应遵守一般标准限定值规定，倾向于选取较低透照电压获取较高对比度。曝光量（管电流与时间的积）应保证检测图像达到较高的信噪比。可采用的最高曝光量决定于 IP 板（系统）特性。一般应测定 IP 板系统的信噪比与曝光剂量关系特性曲线（图 5-9），以便正确控制曝光量，保证检测图像信噪比。

透照技术需要注意的一个问题是背散射防护措施和增感屏使用。由于 IP 板的敏感层（氟卤化钡）对射线照射铅产生的特征辐射敏感，因此不能在 IP 板暗袋后直接用铅板防护背景散射。一般措施是，在 IP 板暗袋与铅板间插放 0.5mm 厚的钢或铜片。IP 板也不使用后铅箔增感屏。

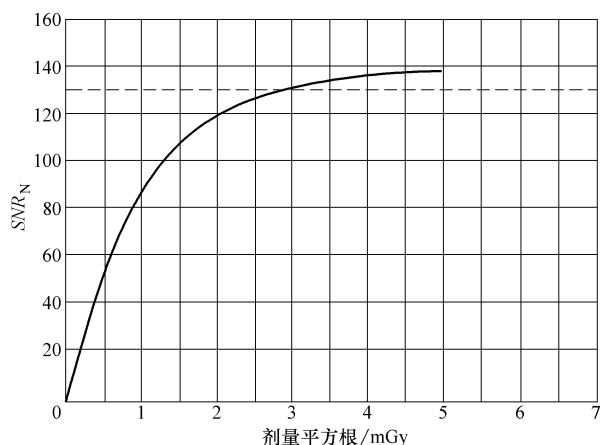


图 5-9 一般分辨率 IP 板（系统）的信噪比与曝光剂量关系

2. 数字化过程

从 CR 系统上述的数字化图像形成过程可以看到，检测图像的空间分辨率主要受到两方面因素的影响。一是 IP 板本身的空间分辨率（不清晰度），二是 IP 板图像读出时采用的扫描点尺寸和扫描点的运动。

IP 板本身的空间分辨率（不清晰度），除了与 IP 板本身的特性相关外（光激荧光物质特性、颗粒尺寸、颗粒分布、光激荧光物质层厚度等），还将受到检测技术因素的影响，包括射线能量、散射线等。

IP 板图像读出的扫描点尺寸（与扫描点该方向的运动）构成数字化图像一个方向的像素尺寸，也就是一个方向的数字化采样间隔。而另一个方向的数字化采样间隔，对于用驱动 IP 板运动的机械机构完成的扫描读出器，由机械机构运动决定；对于 IP 板不运动的扫描读出器，则由扫描激光束在该方向的运动决定。显然，按照采样定理，为了在数字化采样过程不损失 IP 板上信息，必须正确选择激光扫描点尺寸，扫描读出器扫描点的运动或驱动 IP 板运动的机械机构的运动，必须满足采样定理要求。

3. IP 板使用

CR 技术是一种采用 IP 板的间接数字化射线检测技术。IP 板是 CR 技术的关键器材，与胶片射线照相检测技术使用的射线胶片比较，具有的特点是：IP 板可重复使用、IP 板的动态范围远大于胶片、获得检测图像的曝光量可减少（视成像板特点）。

不同的 IP 板（系统）可达到不同的空间分辨率和对比度（信噪比），因此不同 IP 板（系统）获得的检测结果不同。对于检测工作，应选择适宜的 IP 板系统，图 5-10 显示的是同一裂纹不同 IP 板系统的检测图像，可见存在明显差异。

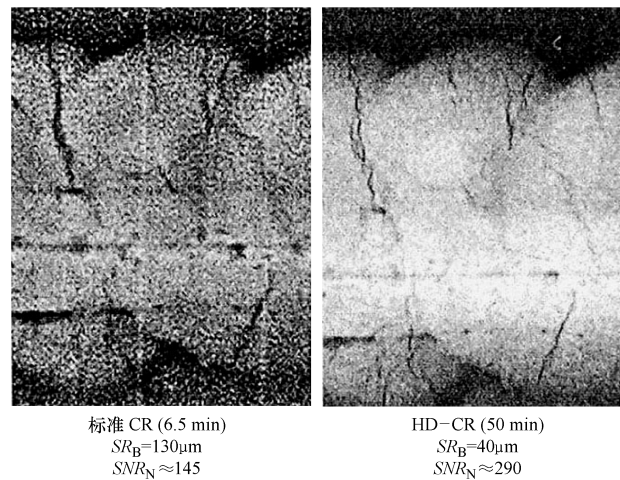


图 5-10 不同 IP 板系统的裂纹检测图像比较

4. 应用

CR 技术的检测过程，类似于胶片射线照相检测技术过程，但它不需要暗室处理过程，获得的是数字检测图像，可运用数字图像处理技术改善图像，利于观察和评定图像。

IP 板获得的检测图像的信噪比与射线胶片处于同样水平（实际上，欧洲的 IP 板分类指标规格化信噪比，就是六类射线胶片系统黑度为 2.0 时的规格化信噪比），由于 IP 板本身的结构噪声限制，很难获得更高的信噪比。由于 IP 板的空间分辨率还未达到胶片水平，因此在同样检测条件下，很难获得比射线胶片更好的检测图像。这使得在检验细小缺陷的能力上，目前还与胶片射线照相检测技术存在差距。但与胶片射线照相检测图像比较，它具有更大的厚度宽容度，图 5-11 显示了这个特点，显然它可同时显示更多厚度图像。

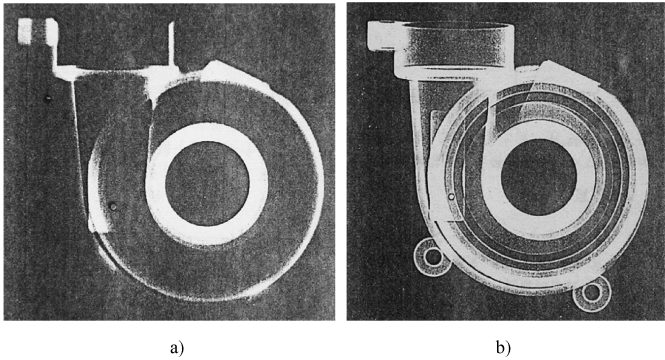


图 5-11 CR 技术与 RT 技术的厚度宽容度比较
a) RT 图像 b) CR 图像

5.4 图像增强器间接数字化射线检测系统

5.4.1 图像增强器检测系统组成

采用图像增强器构成的间接数字化射线检测系统的基本组成部分包括：射线源、图像增强器、机械装置、图像显示与处理单元。图 5-12a 是系统组成部分的基本关系示意图，图 5-12b 是一实际系统图。

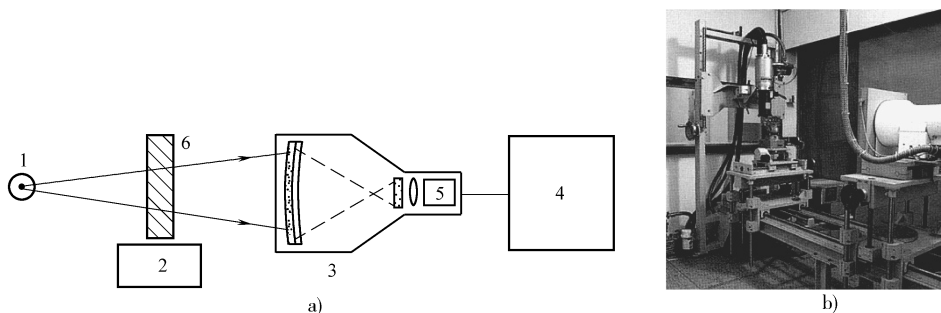


图 5-12 图像增强器间接数字化射线检测系统

a) 系统组成部分的基本关系示意图 b) 实际系统图

1—射线源 2—机械装置 3—图像增强器

4—图像显示与处理部分 5—视频摄像系统 6—工件

实际系统常可分为两大部分，一部分是检验机构，包括射线源、图像增强器、机械装置等，另一部分是控制台，包括图像显示与处理单元（计算机，软件）、操作控制装置和辅助监控装置等。

这类系统由图像增强器完成射线探测与转换，后续摄像系统采集检测图像，再经 A/D 转换获得数字检测图像。

这类系统在检测的同时可获得检测的数字化图像。可以采用静态方式获得检测图像，也可以在动态下近实时地获得检测图像。即在机械装置的驱动下，完成工件被检部位的改变，随着工件的运动，获得不同检验部位的图像。

5.4.2 图像增强器检测系统的技术与应用特点

1. 数字化过程

图像增强器输出屏上给出的可见光图像，需要经过光学系统、视频摄像系统和后续的 A/D 转换，才能获得数字检测图像。

应用中的图像增强器与光学系统和视频摄像系统结合在一起。光学系统将图像增强器输出屏的可见光图像成像到视频摄像系统物镜上，视频摄像系统可将图像分解成一个个像素，（结合 A/D 转换）完成该图像的数字化，并把获得的数字检测图

像传送给图像显示与处理部分。由于采用的光学系统具有很高的空间分辨率（例如，物镜中心在 50Lp/mm 的空间频率时，其 MTF（调制传递函数）值不低于 50%，目镜中心在 60Lp/mm 的空间频率时，其 MTF 值不低于 50%），因此它不会降低图像增强器获得的图像的空间分辨率。但对于视频摄像系统，如果空间分辨率低，则可能降低图像增强器获得的图像的空间分辨率。

可见，所得到的数字化图像的空间分辨率将受到两方面因素的影响。一是在形成可见光图像过程中，输入屏不清晰度的影响。二是视频摄像系统数字化采样过程的影响（也就是它的像素尺寸或采样间隔的影响）。由于目前工业应用的图像增强器输入屏的不清晰度较大（一般认为在 0.3mm 左右），因此它成为控制图像增强器系统空间分辨率（不清晰度）的主要因素。也即，可近似认为图像增强器输入屏不清晰度为图像增强器系统的固有不清晰度

$$U_D = 2SR_b \approx U_s$$

即对图像增强器系统可写为

$$U = \sqrt[3]{[\phi(M-1)]^3 + (2SR_b)^3} \approx \sqrt[3]{[\phi(M-1)]^3 + U_s^3}$$

相应地有

$$U_{im} \approx \frac{1}{M} \sqrt[3]{[\phi(M-1)]^3 + U_s^3}$$

这决定了用常规射线源构成图像增强器检测系统难于获得较高空间分辨率检测图像。

2. 应用

目前工业应用的图像增强器输入屏的不清晰度一般认为在 0.3mm 左右，对于常规焦点的射线源，系统很难达到较高的空间分辨率。一套很好配置的工业图像增强器间接数字化射线检测系统，其系统的最高空间分辨率约为 3.5Lp/mm（X 射线机焦点尺寸为 0.4mm，采用最佳放大透照布置），因此在检测缺陷时与胶片射线照相技术存在差距。这限制了它在要求较高空间分辨率方面的应用，但在不要求较高空间分辨率的检验中可以很好地应用。图 5-13 是同一铸造缺陷（收缩偏析）的检

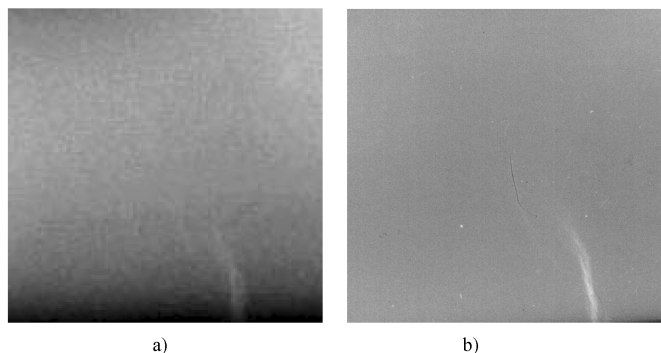


图 5-13 铸造缺陷（收缩偏析）的检测图像对比

a) 图像增强器技术 b) RT 技术（AA400）

测图像对比。

为了获得高空间分辨率，主要的技术途径是采用小（微）焦点射线源、性能好的图像增强器和适当的放大倍数。另外，应用中重要的是严格控制散射线。如果采用微焦点射线源和很高的放大倍数，也可以获得很高的空间分辨率。

* 5.5 微焦点数字化射线检测系统

1. 系统概述

一种特殊的数字化射线检测技术是采用微焦点射线机与辐射探测器构成的实时成像检验系统。系统的基本组成部分包括：射线源、机械装置、辐射探测器、图像显示与处理单元和辐射防护室。系统集成成为两个单元，一个单元是控制柜，它包括了射线机控制部分、机械装置控制部分、图像显示与处理部分、管理和操纵检测系统以及检测操作。另一个单元是检测室，即在一个较大的箱式辐射防护室中设置微焦点射线机、机械装置和辐射探测器。在软件控制下，系统可在静态或动态下进行检测，获得检测数字图像。

系统的辐射探测器主要采用图像增强器或面阵分立辐射探测器。

常用的微焦点 X 射线机焦点尺寸为 $2\mu\text{m}$ ，管电压一般为 160kV （也有达 300kV ），管电流很小（一般不超过 $200\mu\text{A}$ ）。由于焦点尺寸很小，可以采用高达数百以上的放大倍数，从而获得很高的空间分辨率。

这种系统主要应用于检验电子元器件、集成电路、印制电路板等的质量。另外，这种系统采用了一种摆动方式获得物体 CT 图像的技术，用于获得焊点、集成电路、电子元器件等的层析图像，对它们内部结构或质量作出判断。例如，检验焊点虚焊缺陷。

下面讨论以平板探测器作为辐射探测器构成的微焦点系统的一些问题。

2. 系统的空间分辨率

按前面章节的讨论，系统的空间分辨率计算式可总结如下。按美国标准采用三次方不清晰度时为

$$U = \sqrt[3]{[\phi(M-1)]^3 + U_D^3}$$

因有

$$U_D = 2SR_b = 2P_e$$

则

$$U = \sqrt[3]{[\phi(M-1)]^3 + (2SR_b)^3}$$

获得的检测图像不清晰度则为

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt[3]{[\phi(M-1)]^3 + (2SR_b)^3}$$

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt[3]{[\phi(M-1)]^3 + (2P_e)^3}$$

按欧洲标准或 ISO 标准采用二次方不清晰度时为

$$U = \sqrt{[\phi(M-1)]^2 + U_D^2}$$

$$U = \sqrt{[\phi(M-1)]^2 + (2SR_b)^2}$$

获得的检测图像不清晰度则为

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt{[\phi(M-1)]^2 + (2SR_b)^2}$$

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt{[\phi(M-1)]^2 + (2P_e)^2}$$

在实际应用中,常采用 $P_e \approx P$, 因此检测图像不清晰度又可写为

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt{[\phi(M-1)]^3 + (2P)^3}$$

或

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt{[\phi(M-1)]^2 + (2P)^2}$$

这些关系式可用于处理空间分辨率问题。

例如, X 射线机焦点尺寸为 $2\mu\text{m}$, 采用像素尺寸为 $127\mu\text{m}$ 的平板探测器作为辐射探测器时, 如果放大倍数取为 100, 即 $M = 100$, 计算检测图像的不清晰度。

用三次方不清晰度关系式计算为

$$U_{100} = 0.0029\text{mm}$$

当检测图像的空间分辨力用空间频率表示时, 则对应不清晰度的线对值为

$$R = 1/U_{im}$$

$$R_{100} = 345\text{Lp/mm}$$

对检测技术系统, 最佳放大倍数则为

$$M_0 = 1 + \left(\frac{U_D}{\phi}\right)^{3/2} = 1 + \left(\frac{254}{2}\right)^{3/2} = 1432$$

在最佳放大倍数时, 计算可得到检测图像的空间分辨率为

$$U_{im} = 0.0020\text{mm}, R_{im} = 500\text{Lp/mm}$$

实际上, 当放大倍数很大时, 即有 $M \approx M-1$ 时, 微焦点系统的空间分辨率主要由焦点尺寸决定, 其最高空间分辨率为焦点尺寸的倒数。对焦点尺寸为 $2\mu\text{m}$ 的射线源, 则为 $R_{\max} = 500\text{Lp/mm}$ 。这与上面的计算结果相同。由于可采用很大的放大倍数, 很小的细节成像后尺寸放大较大, 对应的空间频率降低, 一般的数字化采样间隔都会满足采样定理的要求, 因此数字化采样过程不再构成空间分辨率的限制因素。

3. 系统可分辨的细节最小尺寸

按采样定理 (或按不清晰度与可分辨的细节最小尺寸关系), 可给出系统可分辨的细节最小尺寸为

$$D_{\min} = \frac{\sqrt{[\phi(M-1)]^3 + (2P_e)^3}}{M}$$

运用此式能估计微焦点射线检测系统可分辨的细节尺寸与技术参数间关系。在这种分辨要求下, 可保证细节初始对比度不发生降低。

例如, 采用焦点尺寸为 $2\mu\text{m}$ 的射线源和像素尺寸为 $127\mu\text{m}$ 的平板探测器构成的系统, 如果要求数字图像可分辨 $5\mu\text{m}$ 细节, 则可如下确定所需要的最小放大倍数。

记 $D = 5\mu\text{m}$, $P_e = P = 127\mu\text{m}$, 则可得到

$$D = \frac{\sqrt[3]{[\phi(M-1)]^3 + (2P)^3}}{M}$$

从此式求得 $M \approx 52$ 。即, 这时检测图像有 $U_{\text{im}} = 0.010\text{mm}$, $R_{\text{im}} = 100\text{Lp/mm}$ 。

图 5-14 是在不同放大倍数下检测同一缺陷的情况, 可见, 由于空间分辨率不同, 显示的图像细节情况也不同。

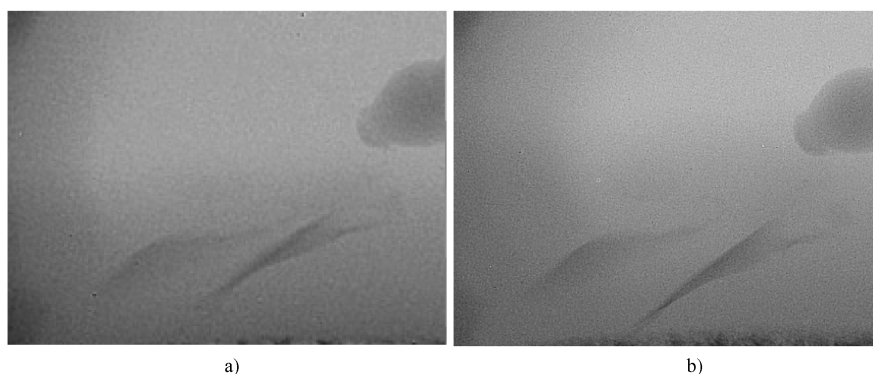


图 5-14 放大倍数对图像细节显示的影响

a) 放大倍数: 33 b) 放大倍数: 65

* 5.6 底片图像数字化扫描技术

* 5.6.1 扫描仪概述

采用图像扫描仪, 通过扫描将底片图像数字化获得射线检测的数字图像, 称为后数字化射线检测技术。在这个过程中完成的是以一定的扫描孔径将射线照相底片图像的信息进行采样、量化, 转换为数字图像信息。

扫描仪按结构与扫描方式可分为三类: 手持式扫描仪、平板式扫描仪、滚筒式(鼓式)扫描仪。图 5-15 是平板式扫描仪的外形。图 5-16 是一种滚筒式扫描仪的外形。

扫描仪的内部结构主要是两部分, 即机械传动机构和光电系统。扫描基本过程是: 光源发出的光在图像上透射, 经光学系统成像到感光器件上, 转换为电信号, 送到 A/D 转换器, 转换为二进制数字信号, 得到数字图像。扫描过程由软件控制。



图 5-15 平板式扫描仪的外形

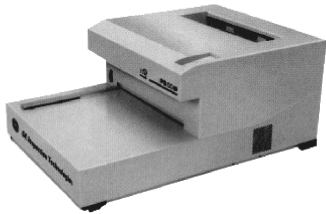


图 5-16 滚筒式扫描仪的外形

对于底片图像数字化扫描技术，最适用的是专为底片图像扫描设计的滚筒式扫描仪，某些平板式扫描仪，也可用于黑度不大于 2.0 底片图像的数字化扫描。

*** 5.6.2 扫描仪的基本性能指标**

扫描仪的基本性能主要是分辨率、可扫黑度范围、位深度等。一般扫描仪器和专业底片图像数字化扫描仪要求的性能项目不完全相同，项目名称也不完全相同。表 5-1 是我国关于一般平板式扫描仪通用规范标准和欧洲关于底片图像数字化扫描仪的最低要求，及两个标准关于主要性能规定内容的对比。

对于底片图像数字化扫描，关心的是扫描仪与底片信息保留和可扫描底片黑度的一些性能。

表 5-1 两个标准对扫描仪基本性能规定的比较

扫描仪器性能项目意义	GB/T 18788-2008		EN 14096-2: 2003	
	名称	单位	名称	单位
读取图像细节信息能力	分辨率	dpi	MTF, 20% 的最大值	Lp/mm
像素识别黑度的能力	色彩 (位) 深度	bit	数字分辨率	bit
可记录黑度范围	动态范围	(D)	黑度范围	(D)
可分辨的黑度最小改变量	—	—	黑度对比度灵敏度	(D)

注：“D”不是单位，仅表示“D”之前的数值为黑度值。

按照欧洲标准 EN 14096-2: 2003 的规定，对于底片图像数字化扫描仪，最关心的主要性能指标应是空间分辨率、黑度范围、黑度对比度灵敏度、数字分辨率。

空间分辨率表示的是扫描仪读取图像细节信息的能力，决定了扫描仪的空间扫描精度。空间分辨率的值越高，扫描仪读取图像细节信息的能力越强。扫描时可在扫描仪给出的空间分辨率范围内设定。

一般扫描仪表示空间分辨率用分辨率这个术语，常用单位是：dpi (dot per-inch)，意义是每英寸的像素点数，它决定了扫描得到图像的像素尺寸。在欧洲标准中，则采用空间频率 (Lp/mm) 或扫描点尺寸表示 (称为像素尺寸)，两者的关系见表 5-2。

表 5-2 空间分辨率与扫描像素尺寸的对应关系

分辨率/dpi	100	127	200	254	300	508	600	800	1200
像素尺寸/ μm	254	200	127	100	85	50	42	32	21

一般扫描仪的空间分辨率应包括水平分辨率和垂直分辨率。水平分辨率是通常所称的“光学分辨率”，它是由扫描仪的感光器件阵列（例如 CCD）决定的，即由感光器件阵列每英寸的单元数目决定。垂直分辨率又称为“机械分辨率”，它由步进电动机每英寸所行走的步数决定。

对于一般扫描仪，当以“600×1200”的方式表示分辨率时，其表示的是扫描仪的“水平分辨率×垂直分辨率”。其中“600”表示的是该扫描仪感光器件阵列每英寸的单元数目为 600，而“1200”表示的是步进电动机每英寸所行走的步数为 1200。由于计算机要求传送给它的图像具有相同的水平分辨率和垂直分辨率，因此两者中的小者决定了实际的分辨率。通常，这都是光学分辨率。

设定了扫描分辨率，也就决定了扫描获得图像的（点数）大小。

欧洲标准规定，底片图像数字化扫描仪的空间分辨率可用线对卡测定。即在设定的扫描参数下扫描线对卡的灰度图像，在得到的扫描图像中，从可看见全长且均被暗线分开的亮线处确定获得的扫描图像的最高空间分辨率。

黑度对比度灵敏度是指扫描仪可分辨的底片最小黑度改变值。

黑度范围是扫描仪在保证黑度对比度灵敏度时，可扫描的最小黑度到最大黑度的范围。这个指标依赖于扫描仪的结构、照明能力、感光元器件的探测时间。对于给出的最小黑度到最大黑度的范围，允许它分为几个段。

这两个指标都采用黑度来表征，有时在数字后加“D”，但通常在数字后都不标出。图 5-17 显示的是某扫描仪器在同样的分辨率下对不同黑度底片（同一缺陷试件）扫描的结果。底片黑度为 2.0 时扫描图像与底片图像基本相同，当底片黑度为 2.9 时扫描图像与底片图像存在明显差别，而当底片黑度为 3.4 时扫描图像仅模糊给出主要缺陷区的大致轮廓。图 5-17 清楚地给出了扫描仪器黑度范围对扫描结果的影响。

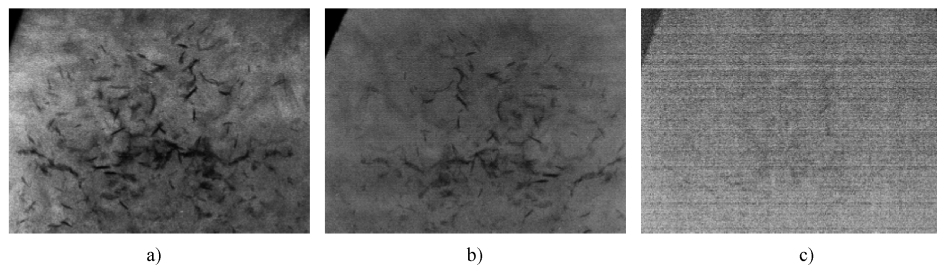


图 5-17 扫描仪器黑度范围对扫描结果的影响

a) 底片黑度 2.0 b) 底片黑度 2.9 c) 底片黑度 3.4

数字分辨率是以“位”(bit)为单位给出的,表示扫描仪的像素可以给出的最多灰度级数(对于彩色,则是可以给出的最多颜色数——色彩深度)。我国也常称它为“位深度”。数字分辨率主要反映的是扫描仪 A/D 转换器可达到的精度。数字分辨率越高,扫描仪区分灰度级别的能力越强。

从扫描仪的工作和使用来看,还关心其他一些性能,如接口与软件、扫描尺寸、扫描速度、扫描模式等。

* 5.6.3 扫描技术

采用扫描仪扫描图像操作的基本过程主要是:运行扫描图像程序、扫描参数设置、扫描等。需要注意的是,这些过程的操作,不同的扫描仪存在差异,应依据扫描仪的规定进行。

在图像扫描中,设置空间分辨率是决定扫描获得的图像质量的基本参数,它直接关系到可获得的细节。图 5-18 是采用不同分辨率扫描同一焊接接头裂纹缺陷得到的图像,空间分辨率为 100dpi 的裂纹图像模糊,空间分辨率为 300dpi 的裂纹图像比较清晰。它们清楚地显示了空间分辨率对细节图像的影响。

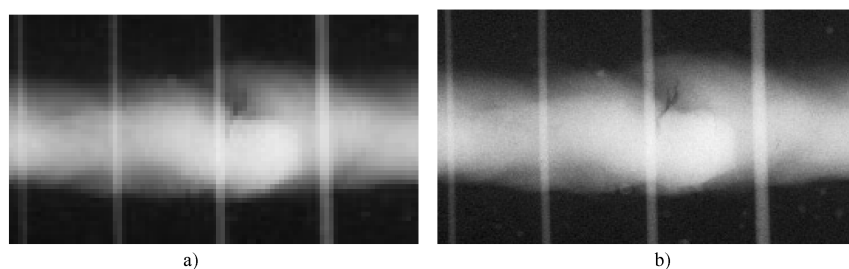


图 5-18 不同分辨率扫描图像的比较

a) 分辨率为 100dpi 的图像 b) 分辨率为 300dpi 的图像

设置扫描分辨率的一个基本依据应该是保证扫描获得图像的不清晰度达到底片图像的不清晰度。在射线照相技术标准中,对射线能量和焦距都做了限制性规定,也就是规定了允许的最大不清晰度。由于不清晰度与空间分辨率之间存在基本关系

$$R = \frac{1}{U}$$

因此可以根据射线照相标准规定的不清晰度要求,得到数字图像空间分辨率应达到的相应要求。也就是得到扫描获得图像的空间分辨率应达到的相应要求。

设定了一定分辨率的扫描过程,理论上可认为是以像素尺寸为采样间隔的数字化过程,因此理想的情况下,按照采样定理,对应于扫描分辨率的像素尺寸 P 与最高的空间分辨率 R (Lp/mm) 的关系应为

$$R \leq \frac{1}{2P}$$

也就是，根据设定的扫描分辨率，先确定出像素尺寸 P ，则可求出对应的扫描图像空间分辨率。

实际中，空间分辨率还会受到其机械系统和数字化电子系统噪声的影响，并不会完全等同于理想情况的结果。一些试验结果也显示，扫描分辨率与扫描图像空间分辨率两者间并不完全满足理想情况的关系。图 5-19 是采用不同扫描分辨率扫描线对卡图像试验的部分结果，表 5-3 是从试验结果得到的扫描分辨率与扫描图像空间分辨率两者间的对应值。从表 5-3 的结果可以看到，得到的试验空间分辨率值总是低于按采样定理计算出的理论值。

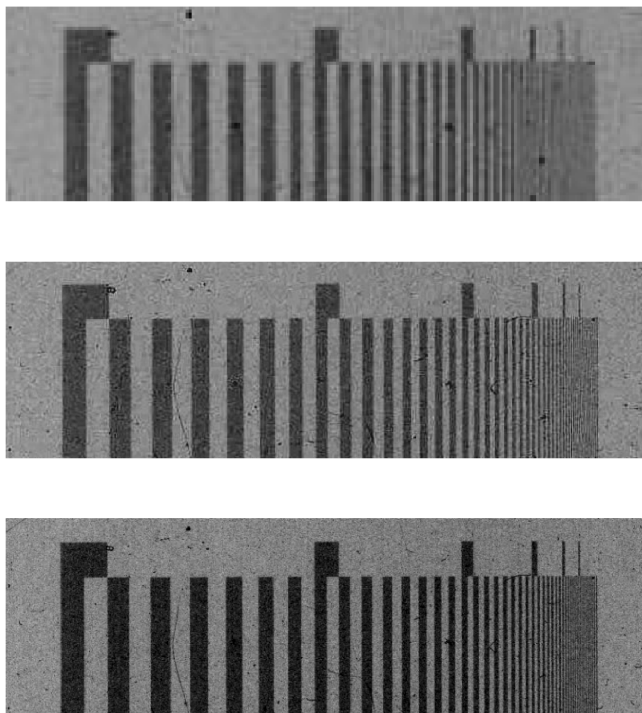


图 5-19 不同扫描分辨率的线对卡图像

注：图中从上向下的扫描分辨率依次为 100dpi、300dpi、600dpi。

表 5-3 扫描分辨率与扫描图像空间分辨率的关系

扫描分辨率/dpi	100	200	300	400	600	800
理论像素尺寸/mm	0.254	0.127	0.085	0.063	0.042	0.032
理论空间分辨率/(Lp/mm)	1.97	3.94	5.90	7.93	11.81	15.62
试验空间分辨率/(Lp/mm)	1.6	3.0	4.4	5.7	7.6	≥10

经验指出，对于通常的铸造缺陷，一般以 300dpi 分辨率扫描可以获得满意的

图像，对于通常的熔焊接头的缺陷，一般以 600dpi 分辨率扫描可以获得满意的图像。当涉及裂纹性缺陷时，应以 600dpi 或更高分辨率扫描图像，对细小裂纹性缺陷（例如电阻点焊的熔核内的细小裂纹、搅拌摩擦焊的细线状弱结合等），常以 1200dpi 分辨率扫描，才能获得满意图像。

* 5.6.4 扫描仪选用

欧洲标准 EN 14096-2：2003《底片图像数字化扫描仪最低要求》按照四个性能指标：黑度范围、黑度对比度灵敏度、数字分辨率和 MTF（调制传递函数）20% 的最大空间频率值，将扫描仪分为三个质量级别：DS、DB 和 DA，并规定了它们的最低性能要求，见表 5-4 和表 5-5。并规定，底片图像数字化扫描仪应以“质量级别”和“MTF20% 的最大空间频率值”的方式表示它的性能。例如，一个质量级别为“DS”和 MTF20% 的最大空间频率值为“4.2Lp/mm”的扫描仪，则应表示为“DS4.2”。

表 5-4 底片图像数字化扫描仪质量分级与最低要求

扫描仪级别	DS	DB	DA
黑度范围 (D_R)	0.5 ~ 4.5	0.5 ~ 4.0	0.5 ~ 3.5
黑度灵敏度 (ΔD_{CR})	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.02
数字分辨率/bit	≥ 12	≥ 10	≥ 10
适用性	底片数字图像存储， 即数字图像作为档案	底片图像数字化分析， 原始底片作为档案	底片图像数字化分析， 原始底片作为档案

表 5-5 底片图像数字化扫描仪分级的空间分辨率要求^①

射线能量	DS		DB		DA	
	像素尺寸 / μm	MTF20% 值 /(Lp/mm)	像素尺寸 / μm	MTF20% 值 /(Lp/mm)	像素尺寸 / μm	MTF20% 值 /(Lp/mm)
$\leq 100\text{keV}$	15	16.7	50	5	70	3.6
$> 100 \sim 200\text{keV}$	30	8.3	70	3.6	85	3
$> 200 \sim 450$, Se-75 Yb-169	60	4.2	85	3	100	2.5
Ir-192	100	2.5	125	2	150	1.7
$> 1\text{MeV}$, Co-60	200	1.25	250	1	250	1

① 如果射线能量不大于 70keV，底片空间分辨率可高于 16.7Lp/mm，扫描仪分辨率应适应底片分辨率，或者应用原始底片作为档案。

关于底片图像数字化扫描仪的选用，标准规定应按底片得到时的射线能量、工件厚度、采用的射线照相级别进行。表 5-6 是标准的规定。这可作为底片图像数字化扫描时选用扫描仪的基本依据。按照这些规定，可以判断不同质量级别可应用的情况。例如：

表 5-6 底片图像数字化扫描仪的选用^①

工件厚度（钢）/mm	DS	DB	DA
< 5	B 级技术	A 级技术	—
≥5	B 级技术	B 级技术	A 级技术

① 对要求检验裂纹或细小缺陷的情况，应选用 DB、DS 级别底片图像数字化扫描仪。

1) 质量级别为“DS4.2”的扫描仪，可用于 200keV 以上能量的 X 射线和 γ 射线，采用各技术级别得到的射线底片的数字化扫描。

2) 质量级别为“DB3.6”的扫描仪，可用于采用 100keV 以上能量的 X 射线和 γ 射线得到的射线底片的数字化扫描，对厚度小于 5mm 的钢工件，只能用于 A 级技术底片数字化扫描，对厚度不小于 5mm 的钢工件，可用于 A 级技术或 B 级技术底片数字化扫描。

应注意的是，标准规定，所说的射线照相技术级别（A 级或 B 级）是指标准 ISO 5579、EN 444、EN 1435、EN 12681 规定的技术级别。

复习参考题

一、选择题（每题的四个选项中只有一个正确答案，请将正确答案的序号填在题末括号内）

1. 对于各种数字射线检测系统，下面列出的必需的组成项目中，错误的是（ ）。

- A. 射线源
- B. 探测器系统
- C. 机械驱动装置系统
- D. 图像显示与存储处理单元

2. 选择适宜检测工作的数字射线检测系统时，下面列出的应考虑的基本性能方面中，错误的是（ ）。

- A. 射线源的能量与焦点尺寸
- B. 探测器系统尺寸与重量
- C. 图像显示与存储处理单元的硬件特性
- D. 图像显示与存储处理单元的软件特性

3. 对于组成面阵探测器的数字射线检测系统，下面列出的常用探测器中，错误的是（ ）。

- A. 非晶硅面阵探测器 B. 气体面阵探测器
C. CMOS 面阵探测器 D. 非晶硒面阵探测器
4. 对于线阵探测器数字射线检测系统, 下面列出的特点中, 错误的是()。
- A. 只能通过扫描方式完成检测图像采集
B. 这种系统必须有机械装置
C. 机械装置的运动构成了各方向的采样间隔
D. 只能以动态检测方式获取检测图像。
5. 关于 DDA 探测器响应校正, 下面列出的必须校正的原因中, 正确的是()。
- A. 探测器各个单元的尺寸、本底噪声可能不同
B. 探测器各个单元的本底噪声、增益性能可能不同
C. 探测器各个单元的增益性能、尺寸可能不同
D. 探测器各个单元的尺寸、坏像素情况可能不同
6. 比较 DDA 数字射线检测系统与 CR 系统, 下面列举的 DDA 系统检测图像优点中, 错误的是()。
- A. 可获得更高信噪比 B. 可获得更高对比度
C. 通常都具有更高空间分辨率 D. 数字化过程简单
7. 采用非晶硅分立辐射探测器构成的数字射线检测系统, 如果像素尺寸为 0.143mm, 射线源焦点尺寸为 0.4mm。下面给出的最佳放大倍数值中, 正确的是()。
- A. 1.6 B. 2.4 C. 3.2 D. 4.0
8. 采用非晶硅分立辐射探测器构成的数字射线检测系统, 如果像素尺寸为 0.143mm, 射线源焦点尺寸为 0.4mm, 透照的放大倍数为 1.6。下面给出的获得的数字图像可实现的最高空间分辨率线对值中, 正确的是()。
- A. 6.0Lp/mm B. 4.8Lp/mm C. 4.0Lp/mm D. 3.2Lp/mm
9. 对于 CR 技术, 下面列出的影响其检测图像空间分辨率基本因素中, 错误的是()。
- A. 采用的 IP 板性能 B. IP 板图像读出时扫描激光点尺寸
C. 扫描的机械装置性能 D. 透照的曝光量
10. 对于 CR 技术 IP 板图像扫描读出器, 下面列出的图像扫描读出使用的光束中, 正确的是()
- A. 激光束 B. 电子束 C. 荧光束 D. 紫外光束

二、判断题 (正确的画√, 错误的画×)

1. 对于数字射线检测系统, 软件需要具有的基本功能可分为采集、显示、存储、测量、处理等方面。 ()

2. 采用分立辐射探测器阵列的直接数字化射线检测系统, 主要是面阵探测器数字射线检测系统。 ()
3. 对于要求达到的检测图像空间分辨率, 当使用的探测器像素尺寸固定时, 检测系统可采用的射线源焦点尺寸, 在采用最佳放大倍数时可大于一般放大倍数情况。 ()
4. 对 DDA 探测器, 可通过响应校正使 DDA 探测器的各个单元的本底噪声降低。 ()
5. 分立辐射探测器阵列中的不同单元, 对不同射线能量具有基本相同的响应, 检测时即使透照厚度改变很大, 也不需要辐射探测器进行“响应校正”。 ()
6. 对于采用面阵探测器的数字射线检测技术, 获得的检测图像的空间分辨率, 探测器的像素尺寸是基本影响因素。 ()
7. 对于采用线阵探测器的数字射线检测技术, 获得的检测图像的空间分辨率, 与检测采用的机械扫描装置性能也密切相关。 ()
8. 检测时所采用的曝光量, 应保证检测图像达到规定的信噪比。 ()
9. DDA 探测器响应校正曲线, 是确定曝光量参数的基本数据曲线。 ()
10. 用图像增强器构成的数字射线检测技术系统, 是一种间接数字化射线检测技术系统。其检测图像的空间分辨率, 不仅受图像增强器输入屏性能影响, 也与后续的图像数字化过程相关。 ()
11. 在 CR 技术中, IP 板图像激光扫描读出时, 设定的激光扫描点尺寸构成图像数字化的采样间隔, 直接影响获得图像的空间分辨率。 ()
12. 对于 CR 系统, IP 板性能、IP 板图像读出器性能、扫描读出参数、控制读出过程软件都影响获得的检测图像质量。 ()

* 三、计算题

1. 某检测系统, X 射线机焦点尺寸为 0.4mm , 要求检测图像的空间分辨率达到 5.0Lp/mm 。确定在最佳放大倍数时可采用的辐射探测器最大像素尺寸与可采用的最佳放大倍数。
2. 某检测系统, 辐射探测器的像素尺寸为 $200\mu\text{m}$, 要求检测图像的空间分辨率达到 4.0Lp/mm 。确定在最佳放大倍数时所允许使用的射线源焦点最大尺寸。
3. 采用焦点尺寸为 $2\mu\text{m}$ 的射线源和像素尺寸为 $200\mu\text{m}$ 的平板探测器作为辐射探测器构成的微焦点系统, 如果采用的放大倍数为 50, 求获得的数字图像可分辨细节的尺寸。

四、问答题

1. 简述直接数字化射线检测技术图像数字化的主要控制因素。

-
2. 简述非晶硅分立辐射探测器数字射线检测技术特点。
 3. 简述 CR 数字射线检测技术的检测基本过程与主要控制因素。
 4. 简述 IP 板系统概念与它对检测图像质量的影响。
 5. 简述如何选用底片图像数字化扫描装置。

* 第6章

等价性讨论

说明：本章内容针对Ⅲ级人员编写，对Ⅱ级人员不作要求。希望从理论上处理等价性问题时，可参阅附录 C。

* 6.1 概述

“等价性问题”讨论的是：数字射线检测技术与常规胶片射线照相检测技术是否具有同等缺陷检验能力的问题。所称的具有“同等缺陷检验能力”的意义，至少应包括在检测图像上正确地显示缺陷的尺寸、分布、基本形貌（或形态），依据这些显示结果，可以给出正确的缺陷性质与质量级别评定结论。

数字射线检测技术与常规（胶片）射线照相检验技术相比，基本不同的是采用了辐射探测器代替胶片完成射线信号的探测和转换，采用了图像数字化技术获得数字检测图像。这使检测技术出现了新的过程，使检测图像具有了新的特点，对技术控制产生了新的要求。从成像过程的基本理论考虑，显然它构成的是与胶片射线照相检测技术不同的成像系统，因此从一般理论上自然就存在两个成像系统是否具有同等成像质量的问题。

实际经验也证明，数字射线检测技术获得的检测图像，与常规胶片射线照相检测技术获得的检测图像并不是各方面都相同。图 6-1 是同一裂纹采用中颗粒胶片技术获得图像与采用 200 μm 平板探测器的直接数字化技术获得的检测图像，显然存在明显的差别。一般说，数字射线检测技术获得的检测图像的基本特点是动态范围大，但空间分辨率低于胶片技术。显然，等价性问题是数字射线检测技术应用必须解决的基本问题之一。

等价性问题需要解决的基本问题可以概括为以下三个方面：

一是讨论数字射线检测技术与胶片射线照相检测技术的检测图像具有同等缺陷检验能力的指标。即，等价指标问题。

二是讨论数字射线检测技术级别与胶片射线照相技术级别具有同等缺陷检验能力（判定的方法程序）问题。这可称为等价技术级别问题。

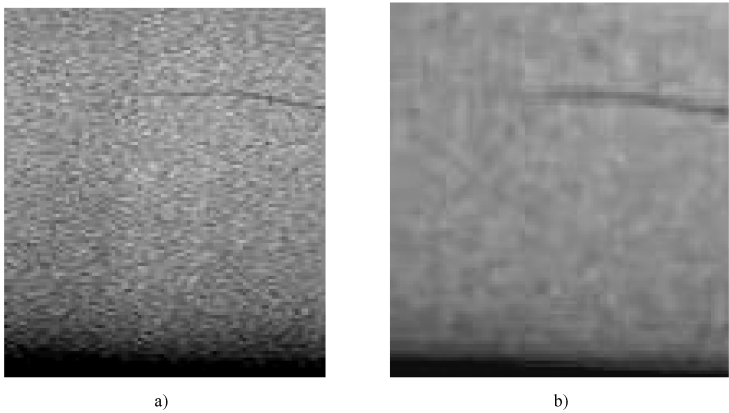


图 6-1 裂纹检测图像比较
a) RT (AA400 胶片) b) DR (面阵 200 μm)

三是讨论数字射线检测技术与胶片射线照相检测技术对某检测对象具有同等缺陷检验能力的问题。这是一般意义的等价性问题。严格时应称为等价技术系统问题，可简单地称为等价范围问题。

实际中，等价性问题主要是讨论数字射线检测技术对缺陷的检验能力，是否能达到胶片射线照相检测技术水平问题。

*** 6.2 等价指标问题分析**

射线检测技术基本理论给出，射线检测图像质量的三个基本因素，如图 6-2 所示。

- 1) 对比度：定义为图像信号强度差与信号强度之比。
- 2) 不清晰度：定义为图像边界扩展的宽度。
- 3) 颗粒度（噪声）：定义为图像信号强度的标准差。

由于颗粒度（噪声）主要是通过信噪比影响检测图像质量的对比度，因此在射线检测技术标准中，并未将颗粒度（噪声）直接作为检测图像质量指标，而是通过直接或间接地控制与信噪比相关的量，完成对该指标的控制。

从射线检测技术关于图像质量基本因素的理论容易确定，二者的检测图像具有同等缺陷检验能力的指标应是，检测图像的对比度灵敏度和空

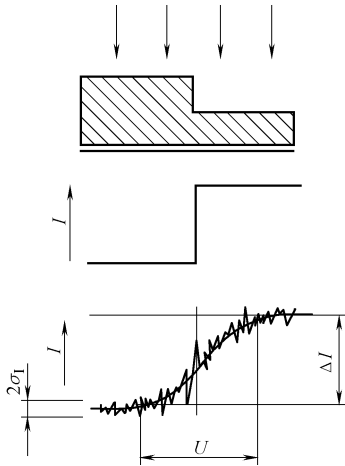


图 6-2 射线检测图像质量的基本因素

间分辨率（不清晰度）处于同等水平。即它们的常规像质计灵敏度和双丝像质计灵敏度达到同样的值。

必须注意，按照射线检测技术的基本理论，对比度、不清晰度（空间分辨率）是检测图像的两个独立的因素，但不清晰度又影响对比度，特别是影响细节的分辨。完整的缺陷检验，包括识别缺陷存在和分辨缺陷。因此必须是两个指标同时达到，才能保证检测图像的同等缺陷检验能力。

如何分析射线照相检测图像不清晰度指标控制，见下一节的讨论。

* 6.3 等价技术级别评定

* 6.3.1 概述

等价技术级别的基本问题是：能否采用某数字射线检测技术标准替代原胶片射线照相检测技术标准完成该项检验工作。应用中的实际问题是：对于原采用胶片射线照相检测技术标准完成的某个检测问题，能否采用某数字射线检测技术系统来完成。

对于等价技术级别问题，作出判断、评定可从射线检测技术对缺陷的检验出发。即，考虑到射线检测技术对缺陷的检验，依靠的是获得的检测图像所给出的信息。此外，还相关于检测图像的显示条件、检验人员识别检测图像信息的能力和经验。因此从客观角度考虑，可认为射线检测技术对缺陷的检验能力基本决定于获得的检测图像质量。

这样，对于等价技术级别问题，简单处理是从检测图像判断。如果数字射线检测技术级别的检测图像质量达到胶片射线照相检验技术级别的检测图像质量 [在技术级别划定的厚度段内，二者的检测图像的对比度灵敏度和空间分辨率（不清晰度）处于同等水平]，即它们的常规像质计灵敏度和双丝像质计灵敏度达到同样的值，则可认为二者具有等价技术级别的缺陷检验能力。

这是等价技术级别问题评定的基本考虑。按此考虑，处理等价技术级别问题实际上主要是评定对某项检验工作，数字射线检测技术级别能否达到胶片射线照相检测技术级别的检测图像质量控制水平问题。完成该评定需要进行以下四个方面的工作。

- 1) 被检验工件基本分析。
- 2) 数字射线检测技术系统基本性能测定。
- 3) 数字射线检测技术系统检验试验。
- 4) 做出分析评定结论。

实际处理时，第2)方面可以从数字射线检测技术理论做出估计，作为评定等价技术级别的基本数据，再进行第3)方面工作。也可以第2)方面与第3)方面

结合进行。具体处理不必严格按照上述顺序逐步完成。

* 6.3.2 被检验工件基本分析

关于被检验工件的基本分析,需要完成的工作是概括被检验工件的厚度范围、缺陷特点分析和分析所采用的胶片射线照相检测技术的空间分辨率控制要求。

1. 被检验工件厚度范围概括

被检验工件厚度范围概括是确定工件需要检验的最小厚度、最大厚度、主要厚度。主要厚度一般选择为胶片射线照相检测技术标准技术级别对常规像质计值规定的厚度分段点厚度。

2. 缺陷特点分析概括

按被检验工件的材料、工艺(包括曾经历过的工艺等)特点,分析、概括工件缺陷的基本特点,分析被检验工件技术条件的基本要求。从这个分析应特别确定缺陷的分布形貌(或形态)特点是否是质量级别评定应考虑的重要因素,工件技术条件要求检验的缺陷最小尺寸是否会受到不清晰度明显影响。为后续对数字射线检测技术的补偿规则控制处理做准备。

3. 胶片射线照相检验技术标准关于检测图像质量控制的分析

对被检验工件分析的另一项基本分析是其采用的胶片射线照相检测技术标准关于检测图像质量的控制指标。

关于检测图像对比度,在胶片射线照相检测技术标准中都做出了明确规定。即采用常规像质计、按技术级别和厚度分段限定应达到的要求值。而且标准明确、直接限定了技术级别检测图像质量的对比度指标。

关于不清晰度,标准在技术级别检测图像质量的指标中并未出现规定,为评定数字射线检测技术或标准的这方面指标是否达到胶片射线照相检测技术标准的要求,显然必须给出胶片射线照相检测技术标准的限定要求。按照胶片射线照相检测技术理论,分析胶片射线照相检测技术标准的规定可以看到,实际上胶片射线照相检测技术标准是通过技术因素的限定实现对该指标的限定。

标准中,典型的规定之一是限定射线源与工件表面的最小距离:

$$f/\phi \geq kT^{2/3}$$

该式很容易就可转换为

$$U_g \leq \frac{1}{k} T^{1/3}$$

式中 ϕ ——射线源(焦点)尺寸;

f ——射线源至工件的距离;

T ——工件射线源侧表面与探测器的距离,通常取为工件本身的厚度;

k ——按技术级别设定的系数。

上面的射线源与工件表面的最小距离规定就限定了几何不清晰度。对射线能量

与透照厚度关系的规定就限定了胶片固有不清晰度。这样按射线检测技术理论

$$U^2 = U_g^2 + U_i^2 \text{ 或 } U^3 = U_g^3 + U_i^3$$

就实现了对检测图像不清晰度的控制。即在胶片射线照相检测技术标准中是通过技术因素控制规定限定了检测图像质量的不清晰度。

关于颗粒度（噪声），对胶片射线照相检测技术标准，可认为通过规定技术级别的胶片选用和底片黑度范围转换为信噪比做出了限定。例如，按照胶片系统分类规定，就可以确定技术级别的颗粒度（噪声）和检测图像信噪比值。表 6-1 是 ISO 11699-1：2008 关于胶片分类的颗粒度规定，第三行是计算的黑度为 2.0 时可得到的检测图像信噪比值。按照噪声服从泊松分布考虑，当底片黑度增大时可获得更高的检测图像信噪比值。可见，胶片射线照相检测技术标准是通过技术控制（胶片选用）和底片黑度要求间接实现颗粒度（噪声）控制的。

表 6-1 ISO 11699-1：2008 标准关于胶片分类的颗粒度规定

胶片类别	C1	C2	C3	C4	C5	C6
颗粒度最大值（ $D=2.0$ ）	0.018	0.020	0.023	0.028	0.032	0.039
黑度/颗粒度（信噪比）（ $D=2.0$ ）	111	100	87	71	62	51

4. 基本数据表

完成上述工作后，对所检验工件应形成胶片射线照相检测技术基本数据表。表 6-2 是一例，此例中工件要求检验的最小厚度为 2mm，最大厚度为 40mm，其他厚度是按 JB/T 4730.2—2005 标准 AB 级规定的厚度分段确定的厚度。关于总的不清晰度采用了平方关系计算式。

表 6-2 胶片射线照相检测技术基本数据表

厚度/mm	V_{\max}/kV	JB/T 4730.2—2005 AB 级规定（钢）		
		线型 IQI 规定值	U/mm	对应双丝 IQI 分析值
2.0	110	W17	0.1373	D12
5.0	135	W15	0.1826	D10 ~ D11
7	150	W14	0.2036	D10
10	170	W13	0.2288	D9 ~ D10
15	215	W12	0.2634	D9
25	300	W11	0.3163	D8
32	350	W10	0.3454	D7 ~ D8
40	400	W9	0.3740	D7 ~ D8

V_{\max} —最大透照电压。

* 6.3.3 数字射线检测系统基本性能测定评定

数字射线检测系统基本性能（即该数字射线检测系统的探测器系统的基本性能），是其基本空间分辨率 SR_b 和规格化信噪比 SNR_N 。在测定了这两项性能后，可对等价技术级别做出基本判断。

1. 数字射线检测系统基本性能测定

如果严格地评定数字射线检测系统基本性能（即其探测器系统的基本性能）应按相关标准规定进行，对于处理等价技术级别问题，可结合后面叙述的检测试验进行，按下面方法简单确定数字射线检测系统基本性能。

关于数字射线检测系统基本空间分辨率，采用双丝像质计直接放置在探测器上，以实际检测的透照参数（但应保证几何不清晰不大于测定不清晰度的 $1/10$ ）透照，获取测定图像。获取测定图像前，对平板探测器技术，应在完成 DDA 校准、坏像素修正后进行。对 IP 板，应控制扫描读出单元数据，扫描点尺寸应满足采样定理（若不能预估结果，则采用最小扫描点尺寸）。采集图像灰度应处于最大值（饱和值）的 80% 左右。

从得到的双丝像质计图像确定测试结果。简单时，按得到的双丝像质计图像中第一个不能区分的丝对确定不清晰度（该丝对的投影轮廓谷深小于 20%），对应的基本空间分辨率为（单位为微米）：

$$SR_b = \frac{1}{2}U$$

准确时，用软件采用双丝像质计图像中间 60% 区灰度数据画出丝对轮廓图测定，见第 7 章相关介绍。

关于数字射线检测系统规格化信噪比的简单测定，选择工件需要检验的最小厚度、中间厚度、最大厚度三个厚度，用适宜检验的透照参数透照，从获得的各检测图像分别测定各自的规格化信噪比。测定方法是：在（某一）检测图像上选择分布在左、中、右的 3 个 50×50 个像素区，用软件计算各自的信噪比，取三者平均值，作为（某一）检测图像的信噪比，然后转换为规格化信噪比。

若工件为焊接接头，应在热影响区测定。焊缝区的信噪比应按热影响区测定值除以 1.4 后得到的值确定。

2. 信噪比分析判断

参照表 6-1 的值和有关数字射线检测标准的规定，可提出数字射线检测系统的信噪比性能适用于替代胶片射线照相检测工作的基本要求，例如，其性能应不低于表 6-3 的要求（或自行规定的更高要求）。也即，数字射线检测系统（或其探测器系统的基本性能，规格化信噪比）应满足一定要求。

表 6-3 探测器系统最低规格化信噪比要求

工件材料		钢、铜、镍基合金			铝、钛	
		≤50kV	50 ~ 150kV	150 ~ 500kV	≤150kV	150 ~ 500kV
SNR _N	A 级	100	70	70	70	70
	B 级	150	120	100	120	100

这样，从测定的探测器系统规格化信噪比，可对数字射线检测系统性能是否适用于被检验工件作出判断。

3. 空间分辨率分析判断

依据测定的数字射线检测系统基本空间分辨率 SR_b 数据，从关系式

$$U \approx U_D = 2SR_b$$

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt[3]{[\phi(M-1)]^3 + (2SR_b)^3}$$

可给出用该数字射线检测系统获得的检测图像不清晰度（或空间分辨率）数据。这样，从获得的基本空间分辨率数据可评定满足胶片射线照相技术关于不清晰度控制要求的厚度范围。该厚度范围可认为是等价技术级别的厚度范围。

如果工件缺陷特点允许采用补偿原则，可按补偿规则做出进一步判断，这可参照后面的讨论。

4. 对比度分析

在数字射线检测系统基本性能测定中，不涉及检测图像对比度指标，因此上面的判断仅是一个初步判断。之所以可以在没有对比度指标下作出一个初步判断，主要原因是数字射线检测技术关于透照技术的基本控制与胶片射线照相检测技术相同，因此当数字射线检测技术的透照参数可保证检测图像的规格化信噪比符合要求时，理论上，数字射线检测技术（在正确确定透照参数后）的检测图像的对比度应不低于胶片射线照相检测技术检测图像的对比度。

* 6.3.4 数字射线检测系统检验试验

比较完整的等价技术级别评定，应完成数字射线检测系统检验试验。对典型厚度，考察在实际检测条件下数字射线检测系统获得的检测图像质量和测定这时的基本性能数据。在试验前应正确确定数字射线检测技术的透照参数。

数字射线检测系统检验试验，需要完成典型厚度检验试验和补偿规则应用验证试验。

1. 检验试验透照参数确定

主要透照参数中，源到工件表面距离、透照电压可按胶片射线照相检测技术控制。

需要注意的是，获取检测图像的曝光量（曝光时间为帧速与叠加幅数相乘的

时间), 它应保证满足表 6-3 所示的规格化信噪比要求, 或自行设置的不低于表 6-3 要求的值。对于焊接件的检测, 规格化信噪比需要在热影响区测定, 这时要求达到的值应将表 6-3 值乘以因子 1.4 (以保证焊缝区的信噪比)。因子 1.4 是从胶片射线照相检测技术中, 底片黑度的热影响区值与焊缝区值的粗略关系确定的值。

2. 典型厚度检验试验

典型厚度检验试验, 即采用数字射线检测系统, 对前面确定的工件厚度中的最小厚度、最大厚度和部分中间厚度进行透照、获取检测图像。试验时, 应按确定的透照参数, 对工件的这些厚度的实际材料试板 (或实际工件的均匀厚度区) 进行透照, 获取数字射线检测图像。从得到的数字射线检测图像, 测定数字射线检测图像的常规像质计值、双丝像质计值、规格化信噪比数据。形成表 6-4 的典型厚度检验试验结果。

在确定部分中间厚度时, 一般应先有数字射线检测系统可实现的检测图像不清晰数据 (理论计算或试验测定数据), 从该数据做出简单判断, 以确定必须试验的中间厚度。显然, 中间厚度越多最后的评定越简单。

表 6-4 数字射线检测系统典型厚度检验试验结果

厚度/mm	测定条件					检测图像测定数据		
	射线机:, 焦点:, 焦距:							
	探测器	V/kV	i/mA	曝光时间	放大倍数	线型 IQI 值	双丝 IQI 值	SNR _N

V—透照电压; i—管电流; IQI—像质计。

3. 补偿规则应用验证试验

由于不清晰度 (空间分辨率) 对缺陷分辨、缺陷尺寸显示、缺陷形貌显示具有重要影响, 为能正确使用补偿规则, 应对某些典型缺陷 (即缺陷形貌、尺寸显示与不清晰度密切相关) 进行必要的补偿规则应用验证试验, 以便确定当数字检测图像质量的不清晰度 (空间分辨率) 未达到胶片射线照相检验技术控制要求时, 是否 (或如何) 应用补偿规则。

补偿规则应用验证试验应选择典型缺陷试件, 按数字射线检测技术确定的透照参数透照, 比较其与胶片射线照相检测技术的缺陷显示形貌或尺寸的差异, 是否处于可接受 (不导致错误质量级别评定) 限度的情况。从此确定是否可采用相应的补偿规则、补偿应限定程度问题。

当理论分析可以给出明确的判断时, 可以不进行补偿规则应用验证试验。

* 6.3.5 等价技术级别评定方法

做出等价技术级别评定需要处理的情况可分为直接评定、计算评定、补偿规则评定三种。

1. 直接评定

从典型厚度检验试验结果,概括出的数字射线检测技术检测图像的常规像质计值、双丝像质计值同时不低于胶片射线照相检测技术控制要求的厚度范围,直接确定为数字射线检测系统可与胶片射线照相检测技术级别具有同等缺陷检验能力的范围。

必须注意的是,应同时保证数字射线检测技术的检测图像的信噪比满足要求。

2. 计算评定

作为补充分析判断,对于射线源尺寸小的数字射线检测系统,关于放大透照下检测图像的清晰度的(空间分辨率)值,在测定了探测器系统的基本空间分辨率后,可按下面计算式

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt[3]{[\phi(M-1)]^3 + (2SR_b)^3}$$

或

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt{[\phi(M-1)]^2 + (2SR_b)^2}$$

通过计算确定在放大透照下检测图像可达到的不清晰度(空间分辨率)值。用此值确定数字射线检测系统与原采用的胶片射线照相检测技术具有同等技术级别缺陷检验能力的厚度范围。

一般,应选择部分放大情况进行必要的试验验证。

3. 补偿规则评定

对于常规像质计值达到了更高值,而双丝像质计值未达到要求的厚度范围,按补偿规则应用验证试验结果做出评定处理。即,确定是否可采用补偿规则、补偿应限定的程度、适用的厚度范围。则确定的厚度范围也评定为具有同等缺陷检测能力范围。

通常情况,补偿处理不会采用2级补偿或3级补偿。

* 6.3.6 例题

需要处理的实际问题可分为下面两种基本情况:

1) 评定采用某一数字射线检测系统,可实现的采用胶片射线照相检测技术标准规定技术检验的厚度范围。

2) 评定用数字射线检测技术标准规定技术替代胶片射线照相检测技术标准规定技术。

[例 1] 某钢的电弧熔焊平板对接接头，母材厚度范围为 2 ~ 40mm，原采用 JB/T 4730. 2—2005 标准 AB 级技术检验。评定是否可采用焦点尺寸为 0. 4mm 射线机与像素尺寸为 200μm 平板探测器构成的数字射线检测系统替代原采用的 JB/T 4730. 2—2005 标准 AB 级技术检验。

解：按照前面给出的评定等价技术级别过程，对于钢的电弧熔焊接头，一般说缺陷特点形貌显示与不清晰关系不密切；评定厚度不是很小区，缺陷尺寸限定不会很小。因此可采用一级补偿规则处理检测图像质量。本例题具体可通过下述步骤完成评定。

(1) 平板对接接头的 JB/T 4730. 2—2005 标准 AB 级技术数据准备 按前面的评定处理方法，以及 JB/T 4730. 2—2005 标准 AB 级技术规定和相关关系式

$$U_g = \frac{1}{10}b^{1/3}$$
$$U_i = 0. 00133 (V_{max})^{0. 79026}$$
$$U = \sqrt{U_g^2 + U_i^2}$$

对本问题可形成表 6-5 的数据。

表 6-5 胶片射线照相检测技术基本数据表

厚度/mm	V_{max} /kV	JB/T 4730. 2—2005 标准 AB 级规定（钢）		
		线型 IQI 规定值	U /mm	对应双丝 IQI 分析值
(≤2) 2	110	W17	0. 1373	D12
(2 ~ 3. 5) 3. 5	120	W16	0. 1627	D11
(3. 5 ~ 5) 5	135	W15	0. 1826	D11 (D11 ~ D10)
(5 ~ 7) 7	150	W14	0. 2036	D10
(7 ~ 10) 10	170	W13	0. 2288	D10 (D10 ~ D09)
(10 ~ 15) 15	215	W12	0. 2634	D9
(15 ~ 25) 25	300	W11	0. 3163	D8
(25 ~ 32) 32	350	W10	0. 3454	D8 (D8 ~ D7)
(32 ~ 40) 40	400	W9	0. 3740	D7 (D8 ~ D7)

(2) 数字射线检测系统检测图像不清晰度估计 依据数字射线检测技术理论，可对数字射线检测系统获得的检测图像不清晰度做出估计，以其为基础确定检验试验的典型厚度的中间厚度值。

X 射线机型号：MXR-451；
射线源焦点尺寸：0. 4mm；

探测器像素尺寸：200 μm ；

透照焦距：1200mm；

探测器与工件源表面距离：80mm（放大倍数近似为 1.07）。

直接可确定的是探测器系统基本空间分辨率约为

$$SR_b = 0.2\text{mm}$$

对应的不清晰度为

$$U_D = 2SR_b = 0.4\text{mm}$$

双丝 IQI 测定值为 D7。由于焦点尺寸小，实际试验得到的检测图像不清晰度（或双丝 IQI 测定值）将与采用的透照布置的放大倍数相关。最佳放大倍数应为

$$M_{op} = 1 + \left(\frac{U_D}{\phi} \right)^2 = 2$$

在不同放大倍数下，检测图像不清晰度（或双丝 IQI 测定值）可按下式计算做出估计

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt{[\phi(M-1)]^2 + (2SR_b)^2}$$

部分计算值见表 6-6。

表 6-6 数字射线检测系统检测图像不清晰度估计

放大倍数	1.02	1.05	1.07	1.2	2	2.2
图像不清晰度/mm	0.3922	0.3814	0.3747	0.3399	0.2828	0.2840
双丝 IQI 测定值	≈ D7	≈ D7	≈ D7	≈ D8	≈ D9	≈ D9

从表 6-6 数据，可以做出的初步判断是：

1) 不采用放大技术、不采用补偿规则时，本数字射线检测系统可应用的厚度范围是 25 ~ 40mm；采用 1 级补偿时，可应用的厚度范围是 15 ~ 40mm。

2) 采用最佳放大倍数、不采用补偿规则，本数字射线检测系统可应用的厚度是 10 ~ 40mm；采用 1 级补偿时，可应用的厚度范围是 7 ~ 40mm。

可判定，本数字射线检测系统不能应用于小于 5mm 的厚度。

表 6-6 的结果与表 6-5 的数据比较，试验时中间厚度 10mm 和 15mm 是必须出现的厚度。

(3) 典型厚度数字射线检测技术检验试验 按上面分析确定典型厚度后，可进行数字射线检测技术检验试验。试测中，在检测技术条件下，同时测定检测图像的不清晰度（空间分辨率）和规格化信噪比。并通过测定的规格化信噪比调整曝光量，满足数字射线检测技术要求的规格化信噪比确定的曝光量作为检验技术的曝光量。

整理试验数据，得到表 6-7 数据。

表 6-7 数字射线检测系统工件典型厚度检验试验结果

厚度/mm	测定条件				检测图像测定数据		
	V/kV	i/mA	帧速 × 积分	放大倍数	线型 IQI 值	双丝 IQI 值	规格化 SNR 值
5	150	4	499ms × 16	1.07	W16	D8	110
10	190	4	499ms × 16	1.07	W15	D8	100
15	250	4	499ms × 16	1.07	W13	D8	100
32	360	4	499ms × 16	1.07	W11	D8	90
40	380	4	499ms × 32	1.07	W10	D7	80

(4) 放大透照验证 按前面关于数字射线检测系统检测图像不清晰度估计，对放大透照进行验证试验。在最佳放大（放大倍数近似为 2）条件下得到结果如图 6-3 所示。从图中可测定，在最佳放大（放大倍数近似为 2）条件检测图像不清晰度双丝 IQI 值为 D9。

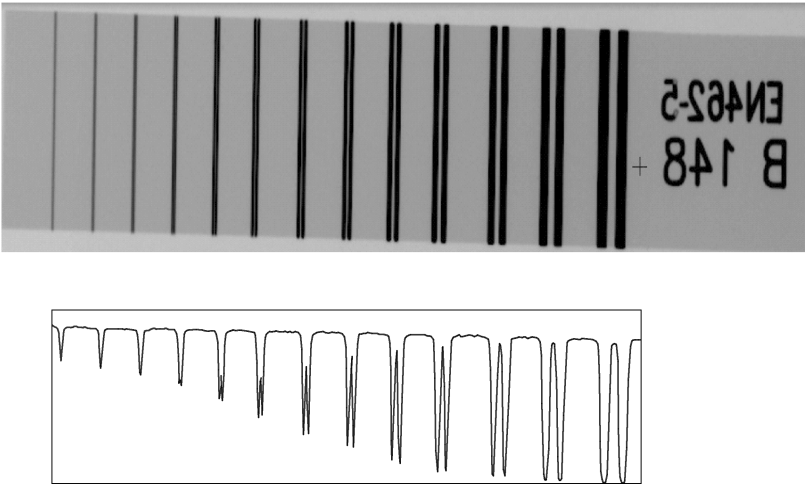


图 6-3 系统基本空间分辨率最佳放大倍数下测定结果

(5) 评定结论 对比表 6-7 与表 6-6 数据，综合上面放大透照和补偿处理可做出的判断是：

- 1) 不采用放大技术、不采用补偿规则时，本数字射线检测系统可应用的厚度范围是 15 ~ 40mm；采用 1 级补偿时，可应用的厚度范围是 10 ~ 40mm。
- 2) 采用最佳放大倍数、不采用补偿规则，本数字射线检测系统可应用的厚度是 10 ~ 40mm；采用 1 级补偿时，可应用的厚度范围是 7 ~ 40mm。
- 3) 更好些，应补充 7mm 作为典型厚度，完成检验试验。

[例 2] 某钢的电弧熔焊平板对接接头，母材厚度范围为 6 ~ 32mm，原采用

GJB 1187A—2001 标准 A 级技术检测，评定是否可采用 ISO 17636-2：2013 标准规定的 A 级技术检测。

解：

(1) 基本分析判断 对本例，按照前面关于等价技术级别评定的讨论，只要分析数字射线检测技术标准技术级别的规定，是否达到原胶片射线照相检测技术标准技术级别规定的要求，就可以做出评定结论。

(2) 胶片射线照相检测技术标准关于不清晰度控制分析 为做出等价技术级别评定结论，主要是给出胶片射线照相检测技术标准关于检测图像不清晰度的控制要求。

按照前面叙述，从胶片射线照相检测技术标准关于最小源到工件表面距离的规定、最高透照电压的规定，确定胶片射线照相检测技术标准关于几何不清晰度、胶片固有不清晰度的控制。然后按照一般理论确定总的模糊度。

本例按

$$U_g = \frac{1}{7.5} b^{1/3}$$
$$U_i = 0.00133 (V_{\max})^{0.79026}$$
$$U = \sqrt{U_g^2 + U_i^2}$$

计算（因 ISO 17636-2：2013 标准关于总的模糊度采用的是平方关系）。

(3) 标准规定比较 对比数字射线检测技术标准与胶片射线照相检测技术标准 A 级技术检测图像的常规 IQI 值和双丝 IQI 值的规定，按厚度形成规定比较见表 6-8。

(4) 分析评定 分析表 6-8 的各厚度段数据可见，数字射线检测技术标准 A 级技术检测图像的常规像质计值在整个厚度范围要求，与胶片射线照相检测技术标准的要求相同，关于双丝像质计值的规定，除在最小厚度 6mm 略低于胶片射线照相检测技术标准的规定值（0.26mm 与 0.25mm）外，其他厚度段均不低于胶片射线照相检测技术标准的规定值，因此可认为，可以采用数字射线检测技术标准 ISO 17636-2：2013 规定的 A 级技术替代原采用 GJB 1187A—2001 标准 A 级技术的检验。

表 6-8 标准 A 级技术检测图像规定比较

厚度/mm	GJB 1187A—2001 标准 A 级技术要求					ISO 17636-2：2013 标准 A 级	
	厚度	V_{\max}	单丝 IQI	计算 U/mm	双丝 IQI	单丝 IQI 值	双丝 IQI 值
5 ~ 7	6	140	W14	0.2511	D9	W14	D9 (0.26mm)
5 ~ 7	7	150	W14	0.2644	D9	W14	D9 (0.26mm)
7 ~ 10	10	170	W13	0.2974	D9	W13	D9 (0.26mm)
10 ~ 15	15	215	W12	0.3416	D8	W12	D8 (0.32mm)
15 ~ 25	25	300	W11	0.4081	D7	W11	D8 (0.32mm)
25 ~ 32	32	350	W10	0.4447	D7	W10	D7 (0.40mm)

* 6.4 等价范围问题的理论处理方法

* 6.4.1 概述

等价范围问题实际是一般性讨论数字射线检测技术与胶片射线照相检测技术的同等缺陷检验能力问题。从本质上说，等价范围问题研究的是数字射线检测技术系统与胶片射线照相检测技术系统的成像特性问题，因此其不能以简单的一些缺陷检验对比试验做出回答，必须是以理论为基础、结合试验才能做出回答。等价范围问题研究的基本思路应是：

- 1) 以成像过程基本理论作为讨论的基本理论。
- 2) 按成像过程基本理论，建立数字射线检测技术系统与胶片射线照相检测技术系统的成像特性的近似处理理论。
- 3) 进行系统性试验，验证建立的成像近似处理理论。
- 4) 进行典型缺陷检验试验，实际检验建立的成像近似处理理论。
- 5) 以建立的成像近似处理理论作出判断。

关于等价范围问题，下面仅给出简单说明，其相关理论参阅附录 C。

* 6.4.2 两种射线检测技术系统概括

按照成像过程的基本理论，对于射线检测技术的成像过程应理解成：在透照过程按射线吸收规律所形成的物体对比度信号，构成射线检测技术成像系统的输入信号。成像过程中，该信号经射线检测技术系统变换、调制、传递，形成输出图像。

按照成像过程基本理论，两种射线检测技术系统获得图像过程可简单概括如图 6-4 所示。

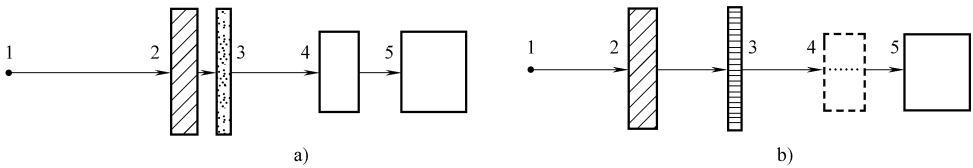


图 6-4 获得图像过程

a) 胶片射线照相检验获得图像过程 b) 数字射线检测技术获得图像过程
1—射线源 2—工件 3—胶片/探测器 4—暗室处理/图像数字化 5—图像显示

常规胶片射线照相检测技术，采用射线胶片完成透照时射线形成的物体对比度信号的探测和转换，胶片特性（包括本身性能和对射线响应性能）、射线照相技术因素和暗室处理过程决定了系统对物体对比度信号的调制、传递过程的特性，决定了获得图像的质量。

数字射线检测技术, 采用辐射探测器代替胶片完成射线形成的物体对比度信号的探测和转换。辐射探测器的特性和图像数字化技术, 决定了系统对物体对比度信号的调制、传递过程的特性, 决定了获得的数字化图像的质量。

* 6.4.3 等价范围问题解答的基本理论

从空间频率概念考虑, 任何物体都可理解为包含着不同空间频率的组成部分。物体的轮廓、物体中的不同结构、物体中的细节 (如存在的缺陷) 等, 按照它们的尺寸, 可对应成不同空间频率。一般说, 物体的轮廓部分形成空间频率的低频部分, 物体的不同结构部分形成空间频率的中频部分, 物体的细节 (如存在的缺陷) 部分形成空间频率的高频部分。

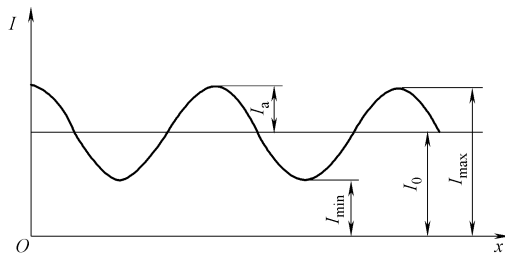


图 6-5 调制度概念

对空间分布信号也可引入调制度概念。调制度一般记为 M , 按图 6-5 所给符号, 调制度概念定义为

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

按照成像过程理论, 对于各种成像过程, 从基本方面考虑可以概括为: 成像系统 (包括成像设备、器材和技术) 对输入做出响应, 给出输出的过程。图 6-6 给出了成像基本过程概括的示意图。也就是, 被观察的物空间对象作为成像系统的输入, 在像空间成像系统输出获得图像。

或者说, 物空间被观察对象作为成像系统的激励信号, 成像系统在像空间输出的图像是成像系统对激励信号的响应。这就是对成像过程的一般性理解或概括。



图 6-6 成像基本过程的示意图

不同成像系统, 由于设备、器材和技术等的差异, 使成像系统具有不同特性, 成像过程也具有不同特点。也就是, 对输入信号产生不同的响应, 导致输出图像质量不同。输出图像质量的一个基本不同是对成像对象 (物) 的调制度做出不同的响应。或者说, 不同成像系统给出不同的像调制度。图 6-7 是成像过程导致调制度改变的示意图 (图中实线表示物信号, 虚线表示获得的像信号)。

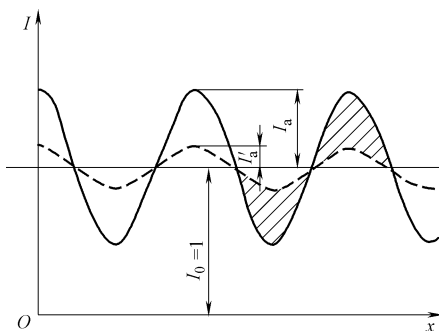


图 6-7 成像过程导致调制度改变的示意图

对成像系统可定义一个反映其这方面特

性的函数，称为调制传递函数，通常记为 MTF 。调制传递函数给出的是得到的像的调制度与物的调制度之比与物的空间频率的关系。即它给出了细节成像后调制度改变的情况，它是成像系统决定输出图像特性的基本性能函数之一。图 6-8 是常用非晶硅（间接转换）探测器和非晶硒（直接转换）探测器的调制传递函数曲线。

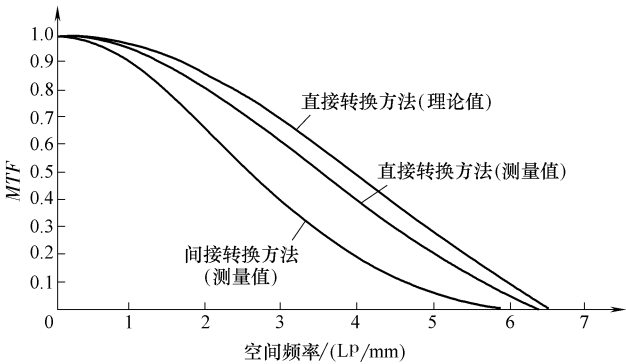


图 6-8 常用探测器的调制传递函数曲线

不同尺寸细节（缺陷）对应不同空间频率，成像后调制度改变情况不同。图 6-9 给出了不同空间频率细节调制度改变的示意图。当像的调制度降低到小于眼睛识别阈值后（有文献给出为 0.03），眼睛将不能识别出该像。对某个尺寸细节（缺陷），这对应于不能检验该尺寸细节（缺陷）情况。也就是，调制传递函数可以反映成像系统对不同尺寸细节（缺陷）的检验能力。

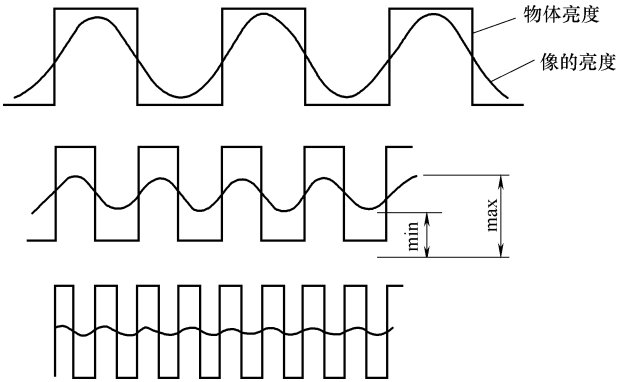


图 6-9 不同空间频率细节调制度改变的示意图

按照上述成像过程的理论，解答等价范围问题的基本思路是比较两个射线检测技术系统的调制传递函数。估计射线检测技术系统调制传递函数方法的基本过程应是：

- 1) 确定射线检测技术的边扩散函数；
- 2) 从边扩散函数求出射线检测技术的线扩散函数；
- 3) 通过傅里叶变换求出射线检测技术的调制传递函数。

这个过程，可采用不同路径完成。例如，通过大量试验，采用双丝像质计直接

确定不同射线检测技术的调制传递函数值。通过试验测定射线检测技术的不清晰度曲线，确定线扩散函数的抽样数据，采用离散傅里叶变换求出射线检测技术的调制传递函数。从理论上给出近似的线扩散函数表达式，从傅里叶变换求出调制传递函数等。

确定了不同射线检测技术系统调制传递函数，就可以判断它们的缺陷检验能力。

* 6.4.4 矩形函数近似线扩散函数的近似处理

对于射线检测技术，采用矩形函数近似线扩散函数，是目前部分 ASTM 标准采用的近似处理。矩形函数近似实际是用直线近似射线检测技术的不清晰度曲线。

如图 6-10 所示，按一般写法，记矩形函数为 $h(x)$ ，高度为 A ，宽度为 $T/2$ ，对称分布。则其傅里叶变换函数可如下求出。

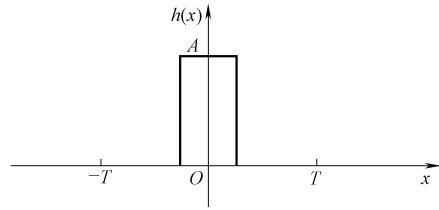


图 6-10 矩形函数

$$H(\nu) = F[h(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} h(x) \exp[-j2\pi\nu x] dx$$

由于矩形函数仅在区间 $[-T/4, T/4]$ 有为 A 的值，上式积分可改写为

$$H(\nu) = \int_{-T/4}^{T/4} A \exp[-j2\pi\nu x] dx$$

计算该积分，得到

$$H(\nu) = \frac{A}{-j2\pi\nu} e^{-j2\pi\nu x} \Big|_{-T/4}^{T/4}$$

$$H(\nu) = A \frac{\sin\left(\frac{\pi\nu T}{2}\right)}{\pi\nu}$$

由于该矩形函数的傅里叶变换为实数（因矩形函数选为对称分布，必然如此）因此有

$$T(\nu) = H(\nu) = A \frac{\sin\left(\frac{\pi\nu T}{2}\right)}{\pi\nu}$$

按照射线检测技术的基本理论，可以建立常规像质计显示与各种细节（缺陷）检测能力关系。将上式转换到讨论的射线检测技术的细节调制度——转换为金属丝像质计。该矩形函数的有关数据与射线检测技术有关数据的关系为

$$U = \frac{T}{2}$$

$$A = \frac{1}{U}$$

$$\nu = \frac{1}{2d}$$

式中 d ——线型像质计金属丝直径。

这样得到射线检测技术对线型像质计不同直径丝的调制度计算式

$$MTF = \frac{2d}{\pi U} \sin\left(\frac{U}{d} \times 90^\circ\right)$$

不同射线检测技术的清晰度不同，对同一直径线型像质计金属丝将给出不同的调制度。这样，就给出了等价性问题关于丝型细节成像调制度计算的一个近似处理关系式。

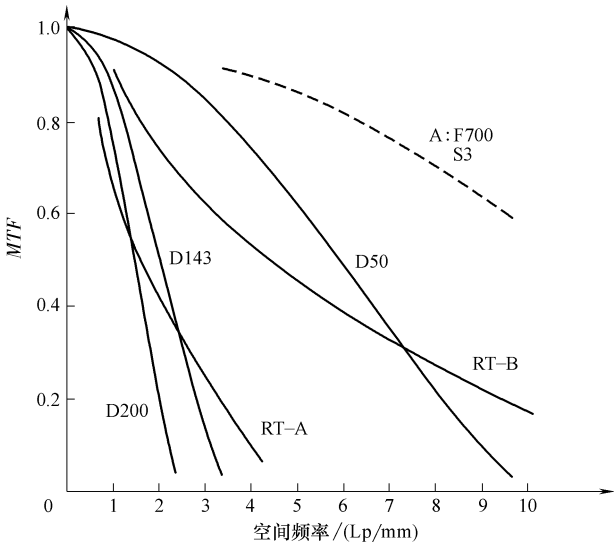


图 6-11 不同射线检测技术的调制度比较示意图（钢）

RT-A—A 级胶片射线照相检测技术对钢要求的最低调制传递函数值；

RT-B—B 级胶片射线照相检测技术对钢要求的最低调制传递函数值；

D50—像素尺寸为 50 μm 的分立辐射探测器可获得的调制传递函数值（ $M=1$ ）；

D143—像素尺寸为 143 μm 的分立辐射探测器可获得的调制传递函数值（ $M=1$ ）；

D200—像素尺寸为 200 μm 的分立辐射探测器可获得的调制传递函数值（ $M=1$ ）。

图 6-11 给出的是，在透照布置的放大倍数为 1（ $M=1$ ）时，按上面的计算式，采用不同像素尺寸分立辐射探测器的数字射线检测技术，与胶片射线照相检测技术不同级别最低控制要求，得到的线形像质计调制度比较图（钢）。显然，从该图可以简单地确定两种技术的线型像质计调制度关系，进而确定对丝型细节等价检验的厚度范围。

图 6-11 中 A 虚线显示的是实际的 A 级胶片射线照相技术（焦点尺寸 3mm，焦距 700mm，采用限制的最高透照电压）对钢、丝型细节可获得调制传递函数计

算值。

此图显示了不同像素尺寸分立辐射探测器的数字射线检测技术可获得的丝型细节的调制传递函数值。按照射线检测技术理论的线型像质计与细节（缺陷）检验关系，则可推断数字射线检测技术与胶片射线照相检测技术对同一缺陷的检验能力。显然，像素尺寸小的分立辐射探测器的数字射线检测技术具有更高的小缺陷检验能力。

由于矩形函数近似处理是采用直线近似实际的不清晰度曲线，因此计算的调制度必然存在误差。按照射线检测技术不清晰度曲线的函数，还可以采用指数函数或其他函数近似线扩散函数做出处理。表 6-9 给出的是对双丝 IQI 用像素尺寸为 $200\mu\text{m}$ 的 DDA 探测器的调制度试验测定值与近似处理的计算值的比较。矩形函数近似在多数范围有较好的近似性，但在关键点存在较大误差。而指数函数在接近像素尺寸对应的分辨率（关键点）附近有较好的近似结果，但其他部分误差较大。即不同的近似估计都存在一定的误差，需要寻求更好的近似，以便给出较好的理论处理。

表 6-9 双丝 IQI 的调制度试验测定值与近似理论计算值的比较（ $200\mu\text{m}$ 的 DDA 探测器）

双丝 IQI	1D	2D	3D	4D	5D	6D	7D	8D
MTF 试验值	0.91	0.82	0.74	0.64	0.46	0.31	0.20	0.05
MTF 矩形函数	0.90	0.84	0.75	0.63	0.47	0.23	0	—
MTF 指数函数	0.78	0.69	0.59	0.47	0.36	0.26	0.18	0.13

复习参考题

问答题

1. 说明等价性问题讨论的主要内容。
2. 简述进行数字射线检测技术与胶片射线照相检测技术等价性评定的过程。
3. 如何分析胶片射线照相检测技术检测图像关于空间分辨率的控制。
4. 简述使用检测图像补偿规则进行等价性评定时应考虑方面。

第7章

数字射线检测技术标准介绍

说明：本章内容系统针对Ⅲ级人员要求编写。对Ⅱ级人员仅要求标准概况和涉及具体检测技术的标准，即 ISO 17636-2：2013 标准的内容。

7.1 国外数字射线检测技术标准编制概况

国外已经制定了较多数字射线检测技术标准，它们可分为技术导则性标准、装置器材标准、检测技术标准三类。比较主要的部分标准目录如下。

(1) 关于技术导则性的标准

- 1) ASTM E1000《射线实时成像技术导则》
- 2) ASTM E2007《CR 技术导则》
- 3) ASTM E2736《数字探测器阵列射线检测技术导则》

(2) 关于数字射线技术的装置器材的标准

- 1) ASTM E2445《CR 系统性能长期稳定性评定》
- 2) ASTM E2446《CR 系统分类》
- 3) ASTM E2597《数字探测器阵列制造特性》
- 4) ASTM E2737《数字探测器阵列特性评定和长期稳定性试验方法》
- 5) EN 13068-2《射线实时成像器件长期稳定性核查》
- 6) EN 14784-1《CR 系统分类》
- 7) EN 14096-2《底片图像数字化扫描系统的最低要求》

(3) 关于检测技术的标准

- 1) ASTM E2033《CR 技术方法》
- 2) ASTM E2698《数字探测器阵列射线检测技术方法》
- 3) EN 13068-3《射线实时成像技术通则》
- 4) EN 14784-2《CR 技术通则》
- 5) ISO 17636-2《焊接接头 X 射线和 γ 射线数字探测器检验技术》

ASTM 的导则性标准，叙述了不同数字射线技术的基本物理原理及涉及的辐射

探测器和技术内容,有助于对相关技术的深入理解。ASTM 的检测技术标准,主要是规定检测技术程序与质量保证控制措施要求,很少涉及具体技术要求。ASTM 的装置器材标准,给出了比较具体规定,特别是关于检测技术系统性能长期稳定性控制方面。

欧洲标准 EN 13068-3,对射线实时成像检验技术,将可采用的实时成像检验系统分为 SC1、SC2、SC3 三类,将技术分为 SA、SB 两个级别,并类似于胶片射线照相检测技术规定了透照布置、透照参数限定性要求,按材料类别和厚度段具体规定了图像应达到的常规像质计值和双丝像质计值的要求。欧洲标准 EN 14784-2,对 CR 技术,将可采用的 IP 板分为 IP1 ~ IP6 六类,将技术分为 IPA、IPB 两个级别,也类似于胶片射线照相检测技术规定了透照布置、透照参数限定性要求,按 EN462-3 标准规定了图像应达到的常规像质计值,同时按新的厚度段划分(并涉及射线能量)规定了图像应达到的双丝像质计值要求。

国际标准化组织标准 ISO 17636-2,规定了焊接接头数字射线检测技术,包括采用分立辐射探测器和 IP 板的数字射线检测技术。其将技术分为 A、B 两个级别。关于透照布置、透照参数的限定性要求,做出了几乎完全类似于胶片照相技术的规定。关于图像质量,对常规像质计值采用了 ISO 19232-3(也即 EN462-3)的全部规定,同时,按新的厚度分段给出了双丝像质计值的要求。在前言和第 1 章范围中都明确指出,标准规定的数字射线检测技术是与该标准第 1 部分胶片射线照相检测技术(ISO 17636-1)具有同等缺陷检测能力的技术。即是具有等价性技术级别的技术。

从这些标准的有关规定,可以帮助理解数字射线检测技术。

* 7.2 ASTM E2597-2007 标准关于 DDA 基本性能测定的规定

ASTM E2597-2007 标准《数字探测器阵列的制造特性》是关于数字探测器阵列的制造特性的标准,它规定了数字探测器阵列性能的评定方法,是一个一般的定量比较 DDA 特性的标准。标准主要用于 DDA 制造厂或集成者向 NDT 用户或顾主提供 DDA 的定量特性。某些试验需要特殊的试验图,以保证提供者或制造厂间结果的一致性。这些试验不期望用户完成,也未设计为长期稳定性追踪和寿命测量。但如果希望,它们可以用于这些目的。

下面简要介绍该标准关于数字探测器阵列基本性能的测定要求。

* 7.2.1 DDA 基本空间分辨率测定规定

1. 测定试验的一般要求

- 1) 测定试验使用双丝像质计。
- 2) 射线束应采用适当准直器限制在仅照射 DDA 区,射线束达到 DDA 的照射

路径上应无任何其他物体（除双丝像质计）。

3) 测定图像采集应在坏像素修正、设定的增益和 A/D 转换下进行。

2. 成像透照布置

如图 7-1 所示，射线源到 DDA 的距离应不小于 1000mm，应保证对于使用的焦点尺寸、放大等条件下，所产生的几何不清晰度符合 ASTM E1742 标准的有关规定，见表 7-1（其他标准一般规定所产生的几何不清晰度应不大于测定不清晰度值的 1/10，这应是正确的规定）。

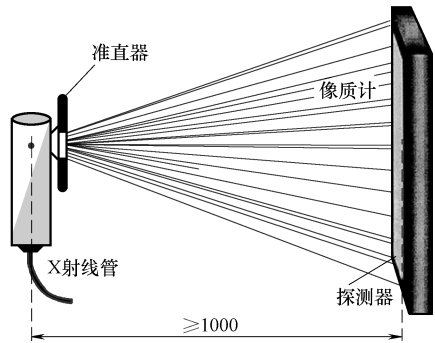


图 7-1 试验布置

表 7-1 ASTM E1742 标准表 4（第 6.23 条）规定

材料厚度/in (mm)	≤2 (50.8)	2 ~ 4 (50.8 ~ 101.6)	>4 (101.6)
允许的最大几何不清晰度/in (mm)	0.020 (0.508)	0.030 (0.762)	0.040 (1.016)

3. 双丝像质计放置

双丝像质计直接放置在 DDA 上，与行（或列）成 2° ~ 5° 范围角。若 DDA 不具有方向性像素，则应分别在平行与垂直方向成像。

4. 试验成像参数

射线能量选择如下：

- 1) DDA 工作在 160kV 以下时，采用 90kV，无预滤波；
- 2) DDA 工作在 160kV 以上时，采用 220kV，无预滤波。

管电流选择应使无双丝像质计处的灰度值为有双丝像质计处的灰度值的 80%（±5%）。如未达到，则应降低管电流或增加射线源到 DDA 的距离。

5. 试验结果计算

试验得到的图像如图 7-2 所示。不使用其他图像处理，从图像中找出：

- 1) 第一个深度（dip）大于 20% 的丝对，其直径记为 D_1 （图中 D7），深度记为 R_1 （28.3%）；
- 2) 第一个深度（dip）小于 20% 的丝对，其直径记为 D_2 （图中 D8），深度记

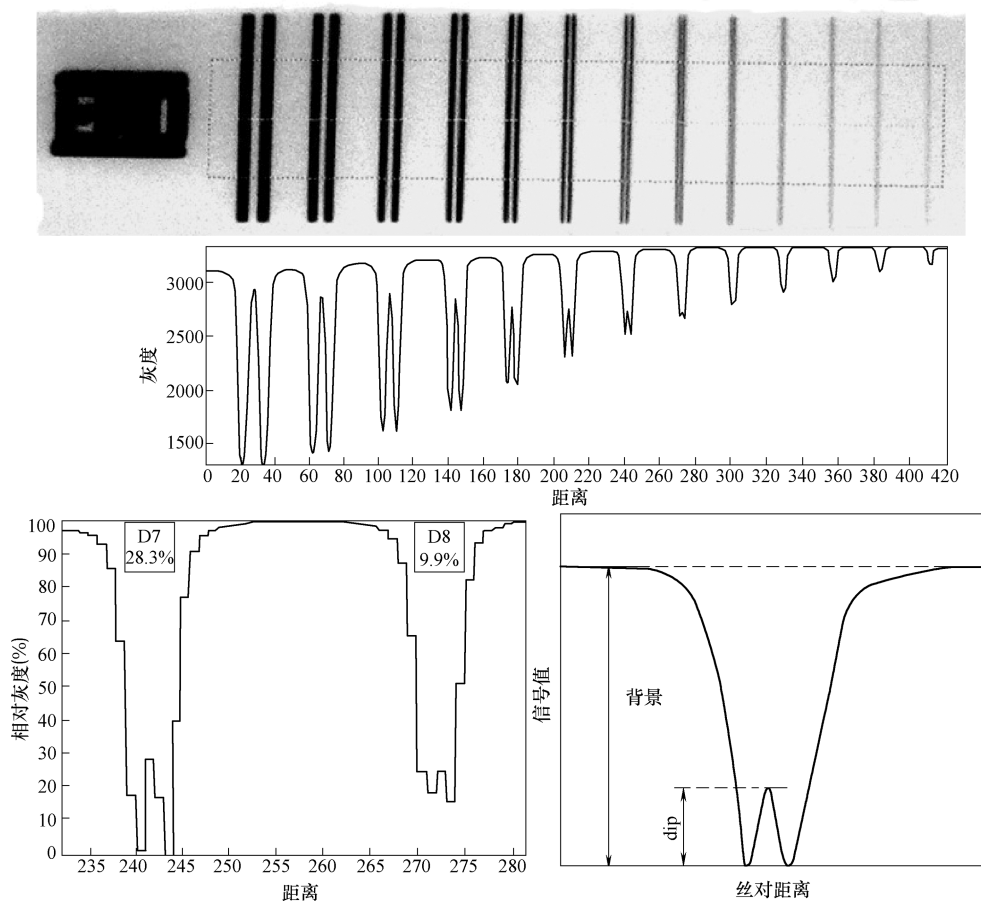


图 7-2 试验得到的图像

为 R_2 (9.9%)。

按下式计算 DDA 的基本空间分辨率：

$$SR_b = D_1 - \frac{(D_1 - D_2)(R_1 - 20)}{R_1 - R_2}$$

其实际是按线状影像的瑞利判据 [深度 (dip) 20%], 并按线性内插确定所求值。

* 7.2.2 DDA 规格化信噪比测定规定

1. 测定试验的一般要求

- 1) 射线束中无其他物体, 应采用适当准直器限制在仅照射 DDA 区, 直接对 DDA 均匀曝光。
- 2) 成像应在坏像素修正、设定的增益和 A/D 转换下进行。

2. 成像透照布置

射线源到 DDA 的距离应不小于 1000mm，应保证对于使用的焦点尺寸、放大等条件下，所产生的几何不清晰度符合 ASTM E1742 标准的有关规定。

3. 测量成像参数

射线应符合表 7-2 的规定。滤波板材料：Al 为 6061、Fe 为 304 不锈钢、Cu 的纯度≥99.9%。管电流和曝光时间应控制为在 DDA 得到设定的某剂量（剂量应采用辐射剂量计测量，最好事先在无 DDA 时测量剂量率）。

表 7-2 数字探测器阵列制造特性测定效率的射线预先滤波规定

管电压/kV	50	90	120	120	160	220	420
滤波板材料，厚度/mm	无	Al, 30	Al, 40	Cu, 3	Fe, 10	Cu, 8	Cu, 16

4. 图像采集

- 1) 在无射线透照、同样积分时间下获取一个偏置图像（offset 图像）。
- 2) 在上面透照条件下采集 2 幅图像。

5. 采集图像处理

- 1) 对采集的 2 幅图像，按制造厂方法修正坏像素；
- 2) 从 2 幅修正后图像做出差图像，以避免各种几何畸变，使测量仅是时间和剂量产生的差异；
- 3) 在已有的偏置图像、差图像、一幅非差图像上，按图 7-3 画定 5 个 50×50 像素区。其中分布在四角的区的边界与 DDA 区边界距离为 DDA 区的 10%。

6. 计算基本数据

在这三幅图像的 5 个区计算，得到以下数据。

- 1) 信号 *GV*：对非差图像，有射线照射形成图像的像素平均值；
- 2) 信号 *OV*：对偏置图像，无射线照射形成图像的像素平均值；
- 3) 噪声 σ ：对差图像，有射线照射形成图像的像素值的标准差。

7. 计算规格化信噪比

$$SNR_N = \frac{\sqrt{2}(GV - OV)}{\sigma} \times \frac{88.6}{SR_b}$$

出现因子 $\sqrt{2}$ 是因计算噪声采用了 2 幅图像。

应注意信噪比与射线束谱和曝光量相关，因此测量结果与射线能量、放置工件材料与厚度相关，图 7-4 是一测量结果举例。

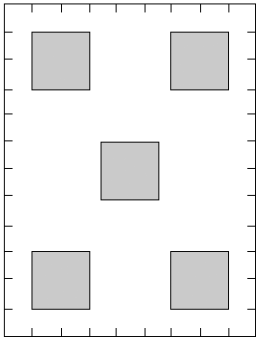


图 7-3 计算像素区分布

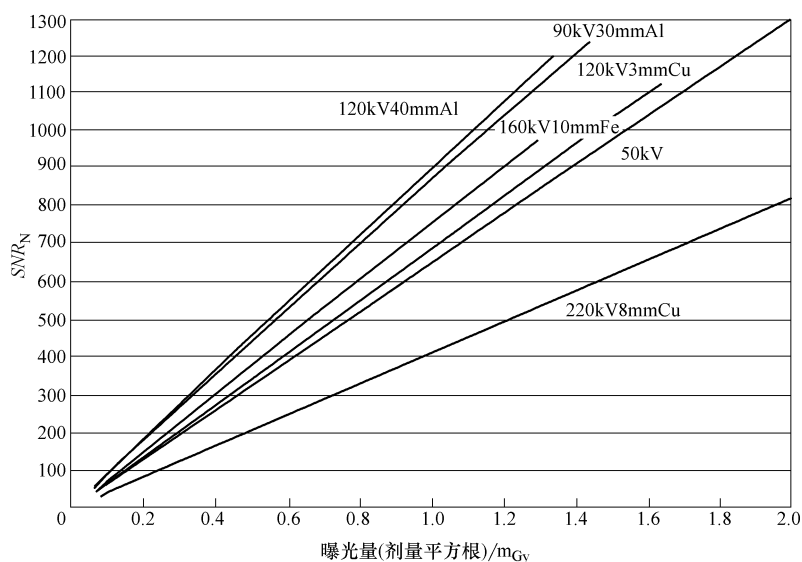


图 7-4 测量结果举例

* 7.3 ASTM E2737-10 标准关于 DDA 基本性能测定的规定

ASTM E2737-10 标准《数字探测器阵列性能评定和长期稳定性》是关于数字探测器阵列性能和长期稳定性评定的标准，标准规定的是工业放射学用 DDA 系统的评定方法，目的是使 DDA 系统性能处于受控稳定状态，以保证 DDA 系统获得的检测图像质量符合用户（或客户）的需要。标准规定了 DDA 系统为确定基本性能、保证长期稳定性需要测定的性能项目、试验方法、性能确定方法。通过这些试验项目，监测系统性能的退化和确定系统性能退化的程度。

下面简要介绍该标准关于 DDA 探测器基本性能测定要求的规定内容。

* 7.3.1 DDA 系统性能测定试验的总要求

测定试验总的要求可归纳为下列方面：

- 1) 所列试验应用标准规定的或 DDA 用户与 CEO 共同规定的测试件，在规定的的时间间隔完成。
- 2) 在试验开始时（采集图像前），应按制造厂的推荐程序校准 DDA 系统，包括偏置、增益、坏像素（修正）；
- 3) 为追溯 DDA 性能，在长期稳定性试验、过程核查试验中，即使以后出现状况改变或应用技术改变，都应使用同样技术、程序。应控制的参数主要包括：X 射线管电压（kV）、X 射线管电流（mA）、焦点探测器距离（FDD，mm）、工件探测

器距离 (*ODD*, mm)、每幅图像曝光时间 (ms)、探测器修正 (校准和坏像素代换)、探测器设置、图像采集软件和图像处理。

* 7.3.2 试件

为进行所设计的试验,除了标准的像质计,标准又设计了两种新试件:五槽楔 (圆底) 和双厚 (度) 板。

1) 像质计为符合 ASTM E1025 标准规定的平板孔常规像质计和符合 ASTM E2002 标准规定的双丝像质计。

2) 五槽楔 (圆底) 的设计,要求分为轻金属合金、重金属合金两大类,材料分别为铝、不锈钢。基本样式是一楔状试块,上面沿长度方向加工了五个圆底槽。规定了各槽的宽度、深度和底圆直径。

3) 双厚 (度) 板的设计样式是由两块板叠合组成,第 2 板 (上面的板) 在 x 方向与第 1 板 (下面的板) 尺寸相同,在 y 方向为第 1 板的 1/2。双板材料相同,为铝、钛、不锈钢。第 1 板厚度对应于被检验工件的最小厚度,两板的厚度和对应于被检验工件的最大厚度。

* 7.3.3 双厚 (度) 板与单独像质计的测定试验规定

考虑到五槽楔 (圆底) 试件槽的设计复杂,其设计要求对标准也仅是非强制性的内容,下面仅简要介绍使用双厚 (度) 板与单独像质计的测定系统基本性能试验的规定内容。

1. 试验的一般要求

双厚板放置在射线束中的位置应与检测工件相同。放置时,双厚板放置 IQI 侧应面向射线源。

双丝像质计放置应放置在双厚板的较薄区,如图 7-5 所示,两个 ASTM E1025 的平板孔像质计应分别放置在每一板上,每个质量指示器应适于该厚度所要求的对比度灵敏度 (1-1T 至 4-4T)。

透照参数中,射线源焦点应与实际应用相同,射线源与 DDA 的距离、双厚板与 DDA 的距离应与检测工件相同。X 射线的透照电压 (kV) 和管电流 (mA) 应与实际应用相同。

在采集图像前,应按制造厂推荐方法对 DDA 的偏置、增益、坏像素进行校准 (修正)。

2. 空间分辨率测定

在满足上面要求下,采集测定需要的图像。从获得的图像建立双丝 IQI 轮廓图。该图是以覆盖双丝 IQI 宽度近似 60% 区的像素灰度值,使用 DDA 系统的软件

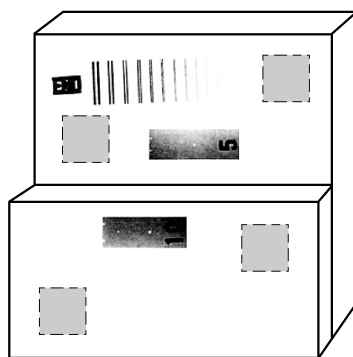


图 7-5 双厚板与像质计位置

建立像素幅度分布图——轮廓图如图 7-6 所示。从该轮廓图确定丝对图像深度（轮廓中间）小于 20% 的丝对，以其中（直径）最大的丝对确定空间分辨率。空间分辨率为该丝对的丝间距，记为 SR_{\min} 。

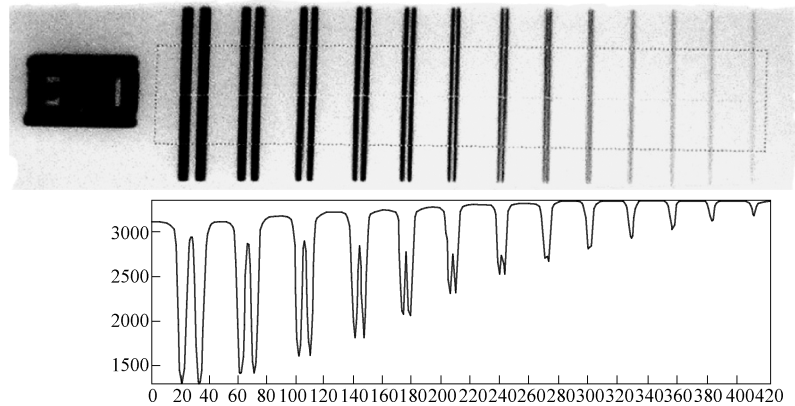


图 7-6 双丝像质计测定图像

3. 信噪比（SNR）测定

从获得的图像（图 7-5）画出四个最少包含 50×50 个像素的目标区（图 7-5 中四个方形阴影区），它们应互不覆盖。用 DDA 系统的软件，测定各区的信号平均值 GV 和标准差 σ 。按下式计算不同厚度区的信噪比。

$$SNR_{T1} = \left(\frac{GV_1}{\sigma_1} + \frac{GV_2}{\sigma_2} \right) \times 0.5$$

$$SNR_{T2} = \left(\frac{GV_3}{\sigma_3} + \frac{GV_4}{\sigma_4} \right) \times 0.5$$

从该信噪比值不难转换为规格化信噪比值。

* 7.4 ASTM E2446-2005 标准关于 IP 板系统基本性能测定规定

ASTM E2446-2005 标准（CR 系统分类）规定了 CR 系统（IP 板、扫描系统、软件与特定的工业金属屏）参数的测量方法，叙述了 CR 系统的分类和评定。用于保证评定的图像质量符合用户的要求。CR 系统评定依赖于 IP 板、扫描系统、软件和扫描参数的组合性能，因此每一测定试验必须包括 IP 板类型、扫描器、软件和扫描参数。

下面简要介绍该标准关于 IP 板系统基本性能测定要求的规定内容。

EN14784-1：2005 标准的规定与 ASTM E2446-2005 标准基本相同。

* 7.4.1 IP 板系统基本空间分辨率测定

1. 测定方法

采用双丝像质计测定基本空间分辨率，应在平行和垂直于扫描方向的两个方向测量。

2. 测定方法概要

1) 透照：对焦点 $\leq 1\text{mm}$ 的射线源，距离应不小于 1m 。应保证产生的几何不清晰度不大于测量不清晰度的 10% 。

2) 双丝像质计直接放置在装有 IP 板、增感屏的暗盒上，应与扫描方向成约 5° 角。

3) X 射线采用铍窗、钨靶、无预先滤波 X 射线源。对应用于大于 160kV 的情况，测定试验用 220kV ；对低能应用情况，测定试验用 90kV 。

3. 基本空间分辨率测定值确定

从曝光获取的图像中，确定第一个不能区分的丝对，该丝对的投影轮廓谷深小于 20% ，如图 7-7 所示。从该丝对按下式确定不清晰度

$$U = 2d$$

式中 d ——该丝对丝的直径。

对应的基本空间分辨率为

$$SR_b = \frac{1}{2} U$$

基本空间分辨率应按 $10\mu\text{m}$ 阶梯取值，采用两个方向测定值中大者作为 IP 板系统的基本空间分辨率。

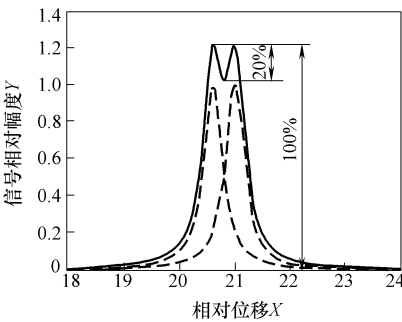


图 7-7 空间分辨率判定

* 7.4.2 IP 板系统规格化信噪比测量

规格化信噪比测量方法可分为阶梯孔曝光方法、阶梯楔曝光方法。阶梯楔曝光方法的测量精度低于阶梯孔曝光方法，但容易进行。下面仅介绍阶梯楔曝光方法。阶梯楔曝光方法对阶梯楔的主要要求是，阶梯楔的材料为 Cu，至少有 12 个阶梯，最大阶梯厚度 11.7mm ，可吸收中心束 90% 剂量。阶梯楔曝光方法的透照布置如图 7-8 所示。

1. 透照布置

1) 阶梯楔与 IP 板的距离应大于

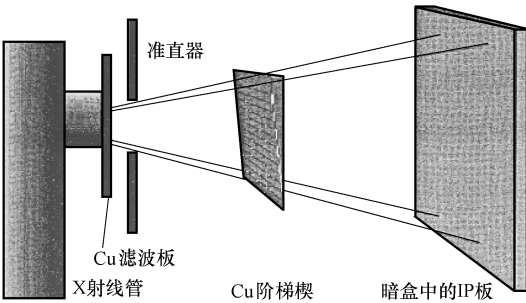


图 7-8 阶梯楔曝光方法

或等于 500mm, 以减少散射线影响。

- 2) 推荐 2 倍几何放大。
- 3) 应使用准直器, 限制射线束。
- 4) 每个阶梯的投影区约为 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ ($\geq 400\text{mm}^2$)。

2. 透照参数要求

- 1) X 射线, 钨靶, 220kV, 8mmCu 滤波, 达到半值层厚度为 Cu3.5mm。
- 2) 至少两次适当剂量 (时间、mA) 曝光。

3. 数据区要求

1) 数据区与阶梯边界的距离应大于 2 倍几何不清晰度, 不应取投影区边界区的数据。

2) 计算数据应从无阴影、无人工缺陷区采集, 应从图像不同区采集。

3) 所使用的区至少含有 20×55 个像素。

4. 结果计算

为保证结果可靠, 可将每个数据区 1100 个像素 (或更多) 分成 55 组 (或更多), 每组有 20 个像素值。对每组计算该组的信号平均值 $I_{m,i}$ 和标准差 $\sigma_{PSL,i}$ 。

$$I_{m,i} = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} I_i \quad \sigma_{PSL,i} = \sqrt{\frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} (I_i - I_{m,i})^2}$$

按统计理论, 对标准差应修正为

$$\sigma_{PSL,i-C} = 1.0179 \sigma_{PSL,i}$$

取各组计算值的中位值 I_m 作为最终的信号平均值, 取各组修正值的中位值 σ_{PSL} 作为最终的标准差值。对最终的标准差值按基本空间分辨率规格化, 得到

$$\sigma_{PSL,100} = \sigma_{PSL} \frac{SR_{b,max}}{88.6}$$

按下式计算规格化信噪比

$$SNR_N = \frac{I_m}{\sigma_{PSL,100}}$$

* 7.5 ASTM E2445-10 标准关于 IP 板系统基本性能测定的规定

ASTM E2445-10 标准《CR 系统鉴定和长期稳定性》是关于 CR 系统鉴定和长期稳定性评定的标准。标准规定了工业 CR 系统用户评定 CR 系统性能的基本参数和试验项目, 主要规定了工业 CR 系统的基本空间分辨率、规格化信噪比、对比度灵敏度, 扫描读出单元的激光束性能、扫描器性能, IP 板的衰退、擦除、人为缺陷的评定试验、试件和主要要求。供 CR 系统性能长期稳定性鉴定和核查, 保证使用中 CR 系统性能的稳定和满足要求。用户可定期完成这些试验, 保证 CR 系统整个寿命期的性能, 使无损检测结果符合需要和保证检测结果可重复性。

下面简要介绍该标准关于 IP 板系统基本性能测定的规定。

* 7.5.1 试验要求

1. 试验技术

试验的射线能量 (keV, γ 源类型)、线质 (预先滤波、X 管类型、管窗口)、剂量 (例如, mA·s 和曝光时间)、CR 系统扫描单元的参数设置、所使用的 IP 板类型及评价的最终图像, 应在合同各方 (使用部门与客户) 达成一致。

2. 试验间隔

对定期控制, 按合同各方 (使用部门与客户) 同意的任何时间间隔进行。

3. 文件

对合同各方 (使用部门与客户) 一致同意的方面和具体内容应形成文件。

4. 试验试件

完成标准规定试验需要的试件主要是: 双丝像质计、楔形线对卡、特殊的 CR 组合试验件等。

* 7.5.2 IP 板系统基本空间分辨率测定试验

1. 试验要求

基本空间分辨率可以采用双丝像质计 (或楔形线对卡, 测定误差大于双丝像质计) 测定。

对平行和垂直于激光扫描束扫描的两个方向都应进行测定。

双丝 IQI 应放置在装有铅增感屏和 IP 板的暗盒上。测定平行方向和垂直方向时, 双丝 IQI 应与激光扫描线方向都成约 5° 角。

测定试验的透照布置, 对焦点尺寸小于或等于 1mm 时, 焦距应大于或等于 1m。对一定焦点和焦距, 应保证的是产生的几何不清晰度不大于测定不清晰度的 10%。

测定试验的射线能量应采用铍窗、钨靶、无预先滤波 X 射线源。对应用于大于 160kV, 测定试验用 220kV; 对低能应用时, 测定试验用 90kV。

2. 基本空间分辨率确定方法

从曝光获取的双丝像质计图像中, 确定第一个不能区分的丝对 (该丝对的投影轮廓谷深小于 20%, 如前面图 7-7 所示)。从该丝对按 E2002 规定确定不清晰度。即

$$U = 2d$$

式中 d ——该丝对丝的直径。

对应的基本空间分辨率为

$$SR_b = \frac{1}{2}U$$

* 7.5.3 IP 板系统规格化信噪比测定试验

1. 试验要求

规格化信噪比采用对 IP 板均匀曝光方法测定。

透照布置的焦距应不小于 1m。在暗盒后面 1m 范围内应无其他物体（包括铅板）。

透照射线一般应用：220kV、8mmCu 滤波板。IP 板盒内使用厚度均为 0.1mm 的前铅增感屏。对低能应用：90kV、32.5mmAl 滤波板。IP 板盒内不使用铅增感屏。

透照时，通过调整电流和时间来调整曝光量，读出系统在最低增益和线性化特性曲线情况下，使图像达到最大读出强度的 $90\% \pm 5\%$ 。

2. 规格化信噪比确定方法

在 IP 板中心区（该区应不可见明显擦伤、灰尘、发暗等）选不少于 1100 个数据，以每组 20 个数据，将数据分成 n 组（ n 不少于 55 组），用这些数据计算。

具体计算过程见前面关于 IP 板系统规格化信噪比测定内容。

7.6 ISO 17636-2: 2013 标准简要介绍

7.6.1 ISO 17636-2: 2013 标准概况

ISO 17636-2: 2013 是国际标准化组织制定、发布的关于焊接接头数字射线检测的标准，它是对应于该标准第 1 部分焊接接头胶片射线照相检测技术的标准。

标准制定经过了较长时间，从 2009 年发布标准的工作草案 ISO/WD 17636-2: 2009 开始，到 2013 年 1 月 15 日发布正式的标准 ISO 17636-2: 2013，标准的制定至少经过了五年时间。而且从 2009 年的草案到 2013 年第 1 版，在规定内容方面也发生了较大的改变。

标准规定了金属材料焊接接头的 X 射线与 γ 射线的数字检测技术，适用于采用 IP 板的 CR 技术与采用数字探测器阵列（DDA）的 DR 技术。适用的焊接接头包括平板接头和管接头。其中管接头包括各种圆形体接头，如各种管、管线阀门、锅炉圆筒、压力容器等。

标准在前言和第 1 部分范围中，都明确指出：在该标准中规定的数字射线检测技术最低要求所形成的数字检测图像，将具有与该标准的第一部分（ISO 17636-1）规定的胶片射线照相检测技术同等的缺陷检验灵敏度。或者简单地说，该标准规定的数字射线检测技术级别等价于该标准第一部分规定的胶片射线照相检测技术级别。

ISO 17636-2: 2013 标准的规定内容，按照 ISO 17636-1 标准的技术系统，规定

了数字射线检测的基本技术。在规定的要求中，贯穿着实现与胶片射线照相检测技术具有同等缺陷检验能力的内在线索。特别是提出了数字射线检测图像质量的补偿原理Ⅱ，给出了数字射线检测图像质量空间分辨率指标达不到要求的一种解决方法，解决了数字射线检测技术应用面临的一大问题。

尽管其在内容（如源到工件表面距离规定）、结构（如图像质量规定、探测器系统要求规定）上还存在不足，甚至引入了错误概念（术语：图像基本空间分辨率），以及多处明显的叙述顺序逻辑问题、文字录入错误（如目录与正文的不一致等），但作为标准，该标准第一次正面处理了“等价性问题”，明确做出了与胶片射线照相检测技术具有同等缺陷检验能力技术级别的规定。在焊接接头（及其他工件）检验领域，为数字射线检测技术代替胶片射线照相检测技术的应用提供了标准。

7.6.2 标准规定内容的基本结构

标准规定内容由八个部分和五个附录组成。即，1. 范围、2. 引用标准、3. 术语与定义、4. 符号与术语、5. 技术级别、6. 一般要求、7. 推荐的数字检测技术、8. 报告及五个附录。主要技术规定在第5、6、7部分和附录。

第5部分技术级别，规定内容包括：（1）技术分级；（2）补偿原理。

第6部分一般要求，规定内容包括：（1）电离辐射防护；（2）表面准备和制造阶段；（3）焊缝在图像中的位置；（4）图像识别标志；（5）定位标志；（6）数字图像搭接；（7）像质计类型和位置；（8）最低图像质量值；（9）人员资格。

第7部分推荐的数字检测技术，规定内容包括：（1）透照布置；（2）管电压和射线源选取；（3）探测器系统和金属屏；（4）射线束方向；（5）散射线减少；（6）射线源与物体距离；（7）几何放大技术；（8）一次透照最大区；（9）（图像）处理；（10）显示器观察条件和数字图像储存。

5个附录为：附录A（环形接头透照次数图）、附录B（最低图像质量值）、附录C（基本空间分辨率确定）、附录D（CR技术的最小灰度值确定）、附录E（灰度值与一般说明）。前面四个附录都属于标准强制性附录，最后的附录E是资料性附录。

从上述规定内容条目，可以粗略看到标准规定的基本结构。

7.6.3 标准主要内容

标准关于一般要求和推荐技术规定的主要要求，可以归纳为：技术级别、探测器系统选择、透照技术、其他技术（显示、存储、校正等）、图像质量要求、人员资格等方面。

1. 技术级别

关于技术级别，标准的主要规定内容与胶片射线照相检测技术标准（ISO

17636-1) 规定相同,也可概括为三方面:检验技术基本级别、存在比 B 级技术更好的技术和技术级别认可规定。

关于检验技术基本级别,标准将技术划分为两个级别:A 级(基本技术)和 B 级(改进技术)。

并指出,规定的 A 级、B 级与胶片射线照相技术规定的 A 级、B 级具有同等的缺陷可识别性。

标准也说明,存在比 B 级技术更好的技术。对技术级别也做出了认可规定。即,如果由于技术原因,某些方面不能达到 B 级技术的规定(例如,源类型、源到工件表面距离),合同可以规定选用 A 级技术的规定,损失的灵敏度应采取措施补偿。对 CR 技术通过增加最小灰度值和信噪比补偿,对 DR 技术通过增加信噪比补偿。

2. 探测器系统选择

对于探测器系统选择,标准的规定分散在一般要求的“IQI 类型与位置”和推荐的数字射线检测技术中关于“探测器系统和金属屏”的规定中。

在“IQI 类型与位置”规定了探测器系统基本空间分辨率的测定方法(附录 C)和应达到值(附录 B)的规定。在“探测器系统和金属屏”中,按技术级别、材料类别规定了获得的检测图像应达到的规格化信噪比的最低要求,间接规定了探测器系统规格化信噪比要求。

3. 透照技术

在推荐的数字射线检测技术中,关于透照技术的规定包括:透照布置、管电压和射线源选取、射线束方向、散射线减少、射线源与物体距离、几何放大技术、一次透照最大区等,主要规定要求与胶片射线照相检测技术相同,某些方面做出了新的规定。

(1) 关于透照布置 标准给出了共 19 个透照方式图,与胶片射线照相检测技术标准(ISO 17636-1)规定相同。还包括了与一般标准“小管问题”内容相同的小管透照技术要求(两种透照方式;采用椭圆成像透照方式的条件、椭圆成像透照方式的透照次数、椭圆成像的椭圆开口宽度;垂直透照方式的采用与透照次数等)。

(2) 关于射线能量 规定内容分为 1000kV 以下的 X 射线和其他射线源,主要规定是射线能量与适用厚度关系的规定。对 1000kV 以下的 X 射线,具体推荐了最高透照电压与透照材料、厚度的关系,这就是胶片射线照相检测技术的规定。对 1MeV 以上的 X 射线和 γ 射线源,推荐了射线源适宜厚度,规定与胶片射线照相检测技术相同。

(3) 关于源到工件表面最小距离 标准做出了较多的规定,整理后可归纳为三方面:基本要求规定、曲面透照规定、补偿探测器固有不清晰度影响的规定。基本要求规定在形式上与胶片射线照相检测技术相同,但附加了探测器的基

本空间分辨率应远小于几何不清晰条件要求。曲面透照的规定对基本要求规定做出了修正式改变。补偿探测器固有不清晰度影响的规定,改变了基本要求规定计算式。进行简单分析就可看到,这部分规定存在可操作性问题。此外,与胶片射线照相检测技术相同,对源在内偏心透照允许源到工件表面距离减少不超过规定值的20%,对源在中心的周向透照允许源到工件表面距离减少不超过规定值的50%。

(4) 关于几何放大倍数规定 这是新的规定,规定内容可概括为两个方面:放大作用说明和放大倍数确定。对放大作用标准指出,CR和DR数字射线检测技术系统,与具有很高空间分辨率的小颗粒胶片比较,一个困难是其探测器或IP板扫描器的大像素尺寸(大于 $50\mu\text{m}$),这可导致IQI灵敏度和基本空间分辨率都不能达到标准规定的要求。克服此问题的方法:一是采用先进的、性质一致的DDA探测器,提高成像信噪比;二是采用放大布置。如果采用这两种措施仍然不能达到要求的图像质量,则该系统不能应用于检验项目工作。对放大倍数的确定,标准规定使用双丝像质计确定选用的放大倍数,对 $2SR_b > \phi$ (射线源尺寸或焦点尺寸)情况,图像不清晰度可从放大倍数 M (在ISO 17636-2:2013中用 ν)、几何不清晰度 U_g 、图像不清晰度 U_{im} 、射线源尺寸 ϕ 按下式估计

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt{(U_g)^2 + (2SR_b)^2}$$

$$U_g = (M - 1)\phi$$

一般来说由于放大倍数对工件源侧和探测器侧不同,因此应按工件透照中心计算,并且源侧和探测器侧的放大倍数差应不超过 $\pm 25\%$ 。

(5) 关于一次透照区 规定包括三方面内容:源在中心一次透照、环形接头透照次数、按技术级别和透照厚度比控制透照次数。具体规定与胶片射线照相检测技术相同。特殊的是按透照厚度比控制时,附加了厚度变化引起的规格化信噪比值限制。

4. 其他技术要求

主要包括图像扫描与读出、DDA探测器的校正、DDA探测器坏像素的插入、图像显示与存储等。

具体规定了数字图像的显示条件最低要求。涉及探测器、扫描器等的操作性要求,一般都简单要求应按制造厂推荐方法、条件、程序、规则等进行操作。原则性规定了定期校正或性能评定。

5. 数字图像质量控制

主要规定内容包括:图像质量指标、测定器件、测定方法、最低图像质量值。

(1) 图像质量 规定采用常规像质计和双丝像质计测定,常规像质计测定像质值,双丝像质计测定图像不清晰度。常规像质计测定像质值的要求与胶片射线照相检测技术完全相同,双丝像质计测定图像不清晰度是标准做出的规定。

测定图像质量的像质计,应采用 ISO 19232-1 (线型 IQI)、ISO 19232-2 (阶梯孔型 IQI)、ISO 19232-5 (双丝型 IQI) 规定的像质计。

(2) 关于最低图像质量值 标准规定可分为三个方面:基本要求、降低规定和补偿规则。关于图像质量值基本要求,标准按技术级别、透照方式、厚度分段规定了常规像质计值,按技术级别、厚度分段规定了双丝像质计值要求。对部分 γ 射线源、部分厚度,对常规像质计值做出了图像质量可降低要求的规定。补偿规则主要是规定当图像质量值的双丝像质计测定值未达到规定要求时,可由线型像质计(或阶梯孔型像质计)达到更高值补偿。这是标准处理数字射线检测面临的具体问题的一个具体规定。

标准也具体规定了测定图像质量时像质计的位置、放置等要求。具体规定可分为:双丝型像质计放置要求、常规像质计放置要求和小管常规像质计放置要求。

6. 人员资格

在一般要求中,标准规定采用本标准进行数字射线检测工作的人员,应按 ISO 9712 标准认证或按与 ISO 9712 标准等同的相关工业部门标准认证,此外,还应通过附加的工业数字射线检测技术培训与资格鉴定。

* 7.6.4 对标准等价性说明的简单分析

标准在前言和范围中都明确指出,标准规定的数字射线检测最低要求所获得的检测图像,具有与该标准的第一部分 (ISO 17636-1) 规定的胶片射线照相检测技术获得的检测图像具有同等的缺陷检验灵敏度。简单说,就是与胶片射线照相检测技术具有等价的技术级别。

对此可从下列方面判断标准的规定是否实现了上述的技术级别等价规定。

1. 基本依据——射线检测技术图像质量

射线检测技术对缺陷的检验,依靠的是获得的检测图像所给出的信息。此外,还相关于检测图像的显示条件、检验人员识别检测图像信息的能力和和经验。因此从客观角度考虑,可认为射线检测技术对缺陷的检测能力基本决定于获得的检测图像质量。

这样,如果数字射线检测技术标准规定的检测图像质量不低于胶片射线照相检测技术标准规定的检测图像质量,则可认为二者具有等价的技术级别。

2. ISO 17636-1: 2003 标准关于检测图像质量的控制

分析 ISO 17636-1: 2003 标准可以看到,标准对检测图像控制分别为:

1) 关于对比度,采用常规像质计、按技术级别和厚度分段限定应达到的要求值。规定与胶片射线照相检测技术标准相同。

2) 关于不清晰度,采用双丝像质计、按技术级别和厚度分段限定应达到的要求值。

因此必须判定其关于不清晰度的规定是否达到了胶片射线照相检测技术标准的

要求。

3. 胶片射线照相检测技术标准关于不清晰度的控制分析

按照射线检测技术理论，可以得到胶片射线照相检测技术标准关于不清晰度的控制，是通过射线源与工件表面的最小距离限制、关于允许的最高射线能量限制来实现的。前者限定了几何不清晰度，后者限定了胶片固有不清晰度。标准通过这些限制已经实现了对检测图像不清晰度的控制。也是因此，在检测图像质量要求中，未再出现关于不清晰度控制指标要求。

4. 对比判断

按照这个分析，不难计算胶片射线照相检测技术标准关于检测图像不清晰度值。计算结果见表 7-3 和表 7-4（表中不清晰度 U 是按平方关系公式计算值）。参照表 7-5 可看到，数字射线检测技术标准（ISO 17636-2：2013）对检测图像不清晰度限制的规定，在各厚度分段点厚度，均达到了胶片射线照相检测技术标准（ISO 17636-1：2013）通过技术控制的限制要求。因此可认为，ISO 17636-2：2013 标准对检测图像不清晰度的规定，达到了胶片射线照相检测技术标准（ISO 17636-1：2013）的限制要求。也就是，ISO 17636-2：2013 标准规定的数字射线检测最低要求所获得的检测图像，与该标准的第一部分（ISO 17636-1）规定的胶片射线照相检测技术具有等价的技术级别。

表 7-3 A 级技术分析计算结果

基本数据（钢）		ISO 17636-1（EN 1435：1997）A 级（钢）						ISO 17636-2 A 级规定
		规定计算值			实际： $\phi = 3\text{mm}$ ， $F = 700\text{mm}$			
T/mm	V_{\max}	U_{g}/mm	U/mm	IQI 值	U_{g}/mm	U/mm	IQI 值	IQI 值/ U/mm
1.2	105	0.1417	0.1511	D12	0.0051	0.0528	D13 + +	D12/0.125
2	110	0.1680	0.1766	D11	0.0086	0.0552	D13 + +	D11/0.16
3.5	120	0.2024	0.2107	D10	0.0150	0.0603	D13 + +	D10/0.20
5	130	0.2280	0.2363	D10	0.0216	0.0659	D13 +	D10/0.20
7	150	0.2550	0.2644	D9	0.0303	0.0760	D13 +	D9/0.26
10	170	0.2873	0.2974	D9	0.0434	0.0884	D13	D9/0.26
15	215	0.3288	0.3416	D8	0.0657	0.1136	D12	D8/0.32
25	300	0.3898	0.4081	D7-D8	0.1111	0.1640	D11	D8/0.32
32	350	0.4233	0.4447	D7	0.1437	0.1980	D10	D7/0.40
40	400	0.4560	0.4804	D7	0.1818	0.2366	D9	D7/0.40
55	500	0.5070	0.5382	D6	0.2558	0.3131	D8	D7/0.40

表 7-4 B 级技术分析计算结果

基本数据（钢）		ISO 17636-1（EN 1435：1997）B 级（钢）						ISO 17636-2 B 级规定
		规定计算值			实际：φ = 3mm，F = 700mm			
T/mm	V _{max}	U _g /mm	U/mm	IQI 值	U _g /mm	U/mm	IQI 值	IQI 值/U/mm
1.5	105	0.0763	0.0927	D13 +	0.0043	0.0527	D13 + +	D13 + /0.08
2.5	115	0.0904	0.1067	D13	0.0107	0.0575	D13 + +	D13/0.10
4	125	0.1058	0.1218	D13	0.0172	0.0628	D13 + +	D13/0.10
6	140	0.1211	0.1379	D12	0.0259	0.0709	D13 +	D12/0.125
8	155	0.1333	0.1513	D12	0.0346	0.0795	D13 +	D12/0.125
12	190	0.1526	0.1742	D11	0.0523	0.0990	D13	D11/0.16
20	260	0.1809	0.2106	D10	0.0882	0.1392	D12	D10/0.20
30	335	0.2071	0.2454	D10	0.1343	0.1880	D11	D10/0.20
35	375	0.2180	0.2612	D9	0.1579	0.2136	D10	D10/0.20
45	430	0.2371	0.2862	D9	0.2061	0.2611	D9	D9/0.26

表 7-5 双丝 IQI 值的不清晰度值

U/mm	1.6	1.26	1.0	0.80	0.63	0.50	0.40	0.32	0.26	0.20	0.16	0.13	0.10
IQI 值	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13

上面仅是一个简单的分析,实际上还可以作更多方面的分析(例如,关于检测图像信噪比)。需要特别注意的是,ISO 17636-2:2013 标准的规定,实现的是数字射线检测技术级别与胶片射线照相检测技术级别的等价技术级别,这并不完全等同于二者的实际应用情况具有等同的缺陷检验灵敏度。这从表 7-3、表 7-4 中给出的一个按实际情况计算的胶片射线照相检测技术检测图像不清晰度可清楚说明。其主要的影晌应是对细小缺陷的分辨方面,也就是缺陷形貌显示和细小缺陷尺寸显示方面。

深入理解上面的等价性问题,应从成像过程理论考虑,这可参阅附录 C。此外,标准的某些规定,也值得做出进一步分析讨论。

复习参考题

问答题

1. 简要说明目前关于数字射线检测技术标准制定的情况。
2. 说明 ASTM E2597 关于 DDA 基本性能测定的主要规定。
3. 说明 ASTM E2737 关于 DDA 基本性能测定的主要规定。

4. 说明 ASTM E2445 关于 IP 板系统基本性能测定的主要规定。
5. 说明 ASTM E2446 关于 IP 板系统基本性能测定的主要规定。
6. 简述 ISO 17636-2: 2013 标准对技术级别做出的主要规定。
7. 简述 ISO 17636-2: 2013 标准对探测器系统性能要求做出的主要规定。
8. 简述 ISO 17636-2: 2013 标准对透照技术做出的主要规定。
9. 简述 ISO 17636-2: 2013 标准对检测图像质量做出的主要规定。
10. 说明 ISO 17636-2: 2013 标准对检测图像质量补偿规则的主要规定。
11. 简单说明对 ISO 17636-2: 2013 标准关于与胶片射线照相检测技术具有同等缺陷检验能力的理解。

第8章

数字射线检测技术实验

8.1 辐射探测器系统基本性能测定实验

简单地说，对于直接数字化射线检测系统，辐射探测器系统，就是分立辐射探测器（DDA）本身；对于 CR 间接数字化检测技术系统，辐射探测器系统则是 IP 板系统，包括 IP 板、扫描读出器、扫描读出参数和软件。

辐射探测器系统基本性能是其基本空间分辨率和规格化（标准、归一）信噪比。它决定于辐射探测器系统本身的结构与特性，也与射线束谱和剂量有关。

辐射探测器系统基本性能测定可分为两类，一是系统特性，二是检验应用条件下的特性。前者应按规定的特定条件测定，以便相互比较。后者按检验应用条件测定，用于监测系统性能的稳定性、保证系统性能的适用性。

需要注意的是，辐射探测器系统的基本空间分辨率可能具有方向性，即在不同方向基本空间分辨率不同。确定系统基本空间分辨率时，测定应在两个方向（垂直、平行像素分布方向）进行，取其中较差者作为辐射探测器系统的基本空间分辨率指标。

实验 1 和实验 2 对 IP 板系统也可进行，但实验在图像读出时，激光扫描点尺寸应设置在最小尺寸，A/D 转换位数应设置在最高位。

实验 1 DDA 辐射探测器基本空间分辨率与 MTF 测定

实验内容

采用双丝像质计测定分立辐射探测器（DDA）的基本空间分辨率与 MTF （调制传递函数）。

实验器材

X 射线机（焦点尺寸已知或测定，尽可能采用铍窗、钨靶、无预先滤波 X 射线源）、200 μm 像素（或其他尺寸像素）分立辐射探测器（DDA）和双丝像质计 2 只。

实验过程

(1) DDA 校准（修正） 对所使用的 X 射线机进行训机操作后，按制造商推

荐方法对 DDA 的偏置、增益、坏像素进行校准（修正）。

(2) 透照布置 (图 8-1)

1) 双丝像质计直接放置在 DDA 辐射探测器上, 一只平行于 DDA 像素行, 另一只垂直于 DDA 像素行 (平行于列), 双丝像质计放置时, 其金属丝应与 DDA 像素的行或列成 $2^\circ \sim 5^\circ$ 小角度, 如图 8-2 所示。

2) DDA 的像素行应平行于 X 射线机管头的轴线方向。

3) 射线源到 DDA 的距离大于或等于 1000mm, 保证几何不清晰度很小。

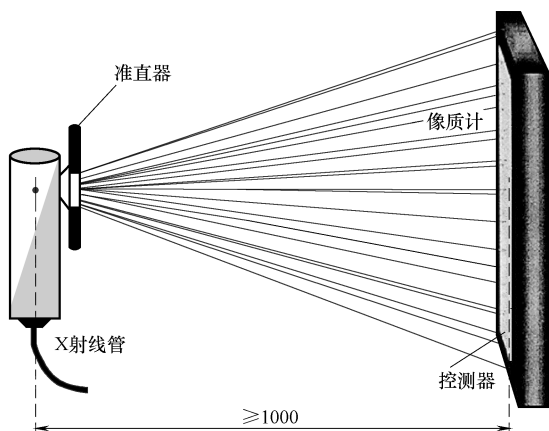


图 8-1 透照布置

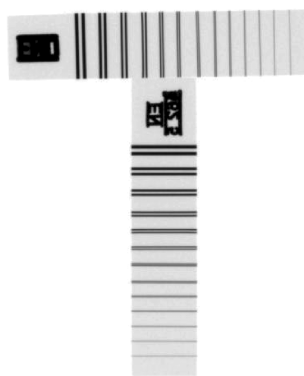


图 8-2 双丝像质计放置

(3) 射线能量与曝光量

1) 采用 90kV (或 220kV), 无预滤波。

2) 管电流选择应使无双丝像质计处的灰度值为有双丝像质计处的灰度值的 80% (±5%)。

(4) 透照图像 透照后, 获得双丝像质计在 DDA 辐射探测器上平行于像素行和列两个方向的图像, 如图 8-2。用软件分别对图中两个方向双丝像质计影像中间 60% 区 (图 8-3 上图虚线框区) 测定灰度, 获得丝对灰度分布曲线 (图 8-3 下图)。

(5) 基本空间分辨率测定

1) 在图 8-3 的下图中, 确定出下面两个丝对:

第一个深度 (dip) 大于 20% 的丝对, 记其直径为 D_1 (图 8-4 中 D7), 深度记为 R_1 (图 8-4 中为 28.3%);

第一个深度 (dip) 小于 20% 的丝对, 记其直径为 D_2 (图 8-4 中 D8), 深度记为 R_2 (图 8-4 中为 9.9%)。

2) 按下式计算 DDA 的基本空间分辨率:

$$SR_b = D_1 - \frac{(D_1 - D_2)(R_1 - 20)}{R_1 - R_2}$$

3) 以两个方向中较差的值作为探测器系统的基本空间分辨率。

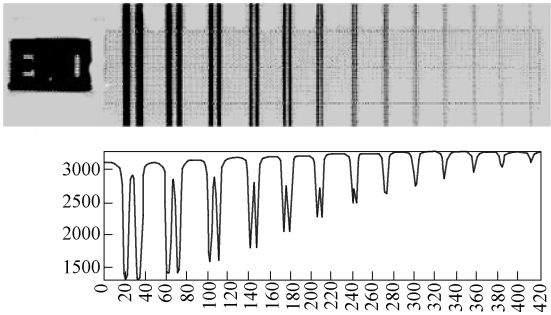


图 8-3 测定图像举例

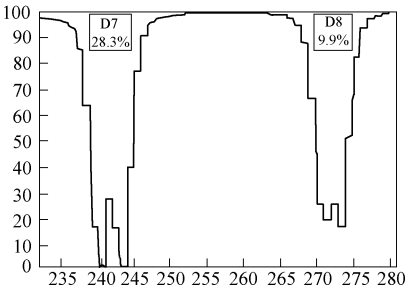


图 8-4 测定图像举例

(6) MTF 测定

- 1) 确定图 8-3 下图图像各丝对的幅度最大值（记为 I_{\max} ）和中间的幅度值（记为 I_{\min} ）。
- 2) 按下式计算各丝对的调制度值

$$MTF = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

各丝对的空间频率（Lp/mm）为（ d 为各丝对丝的直径，mm）

$$R = \frac{1}{2d}$$

- 3) 形成表 8-1 所示测定数据表，用该表数据在图 8-5 坐标系中画出 DDA 探测器（在该测定条件）的调制传递函数曲线。

表 8-1 探测器 MTF（调制传递函数）测定数据表

双丝 IQI 丝对编号							
丝对丝直径 d /mm							
丝对空间频率/（Lp/mm）							
丝对最大幅度 I_{\max}							
丝对中间幅度 I_{\min}							
MTF							

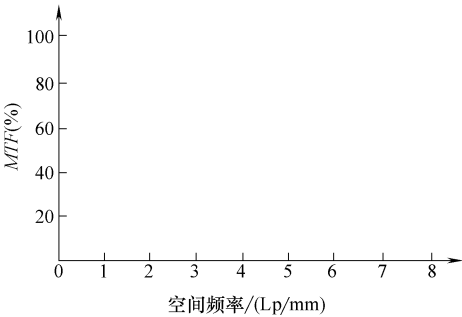


图 8-5 探测器的调制传递函数曲线

实验2 DDA 辐射探测器规格化（标准、归一）信噪比测定

实验内容

测定分立辐射探测器（DDA）的规格化信噪比。

实验器材

X 射线机（焦点尺寸已知或测定，尽可能采用铍窗、钨靶、无预先滤波 X 射线源）、200 μm 像素（或其他尺寸像素）DDA。

实验过程

(1) DDA 校准（修正） 对所使用的 X 射线机进行训机操作后，按制造商推荐方法对 DDA 的偏置、增益、坏像素进行校准（修正）。

(2) 透照布置（图 8-6）

1) 射线源到 DDA 的距离大于或等于 1000mm，保证几何不清晰度很小，测定区曝光均匀。

2) 滤波板直接放置在 X 射线管窗口，使未滤波射线不会到达 DDA。DDA 得到的剂量率应无散射线干扰。

(3) 射线能量与滤波 管电压：120kV；滤波板：Al，40mm（或 Cu，3mm）。

(4) 图像采集要求

1) 在采集图像前，确认已按制造商的推荐程序校准 DDA 系统，包括偏置、增益、坏像素修正。

2) 在适当曝光量（积分时间）下获取图像。

(5) 试验结果计算

1) 确定数据区。在采集图像上，按图 8-7 用图像处理软件确定 5 个 50 \times 50 像素区。其中分布在四角的区的边界与 DDA 区边界距离为 DDA 区的 10%。

2) 计算基本数据。在这 5 个区，用软件（统计窗）分别计算像素平均值 GV_i 和像素值的标准差 σ_i 。

3) 计算信噪比。按下式计算信噪比

$$SNR = \frac{1}{5} \times \left(\frac{GV_1}{\sigma_1} + \frac{GV_2}{\sigma_2} + \frac{GV_3}{\sigma_3} + \frac{GV_4}{\sigma_4} + \frac{GV_5}{\sigma_5} \right)$$

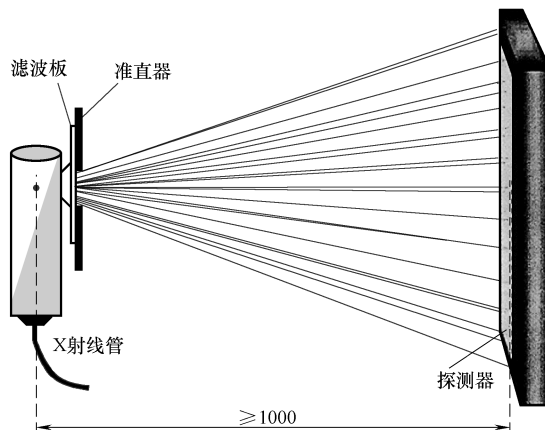


图 8-6 透照布置

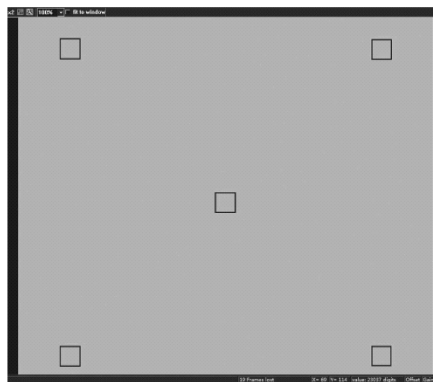


图 8-7 数据区分布

4) 计算规格化信噪比。

$$SNR_N = SNR \times \frac{88.6}{SR_b}$$

5) 改变曝光量（剂量）重复上述测定过程，形成表 8-2 所示测定数据表。用该表数据在图 8-8 所示坐标系中画出信噪比与曝光量平方根关系曲线。实验中画该关系曲线时，横坐标单位可以采用毫安·分（mA·min）、毫安·秒（mA·s）或毫安·毫秒（mA·ms）。

探测器响应校正不同，得到的信噪比与曝光量平方根关系曲线可以不同。

表 8-2 探测器信噪比与曝光量关系曲线测定数据

数据序号	曝光量	曝光量平方根	SNR	备注

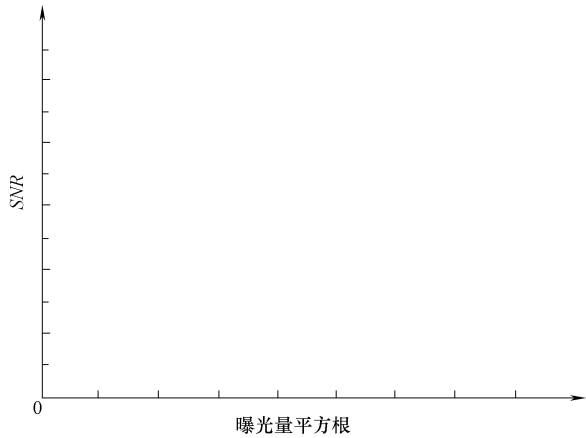


图 8-8 探测器信噪比与曝光量关系

8.2 辐射探测器系统性能对缺陷检验的影响

数字射线检测技术对缺陷的检验能力，简单说，决定于辐射探测器系统性能和采用的透照技术。辐射探测器系统性能对缺陷检验能力的影响，正如在胶片射线照相检测技术中胶片类别的作用。

从缺陷检验考虑，最关心的分立辐射探测器（DDA）性能主要是像素尺寸、A/D 转换位数，当然还有其他方面，如效率、对比度灵敏度、材料厚度范围、坏像素等。对 IP 板系统，关心的是 IP 板本身的性能，及其与扫描单元、扫描参数（扫描速度、扫描激光强度等）共同决定的基本空间分辨率（有效像素尺寸）、扫描单元的 A/D 转换位数等。

实验 3 DDA 辐射探测器像素尺寸对缺陷检验的影响

实验内容

采用两种不同像素尺寸的分立辐射探测器（DDA），在同样透照条件下获取缺陷、双丝像质计、线型像质计的检测图像，对图像的缺陷细节变化、双丝像质计及线型像质计的可识别情况进行比对。

实验器材

X 射线机（焦点尺寸已知或测定）；DDA 像素尺寸：200 μm 与 127 μm （或其他尺寸像素）；双丝像质计 1 只与适宜的线型像质计。

缺陷试件：气孔、裂纹、缩孔。气孔尺寸应成系列变化，裂纹、缩孔应具有从小到大的细节变化，如图 8-9 所示。

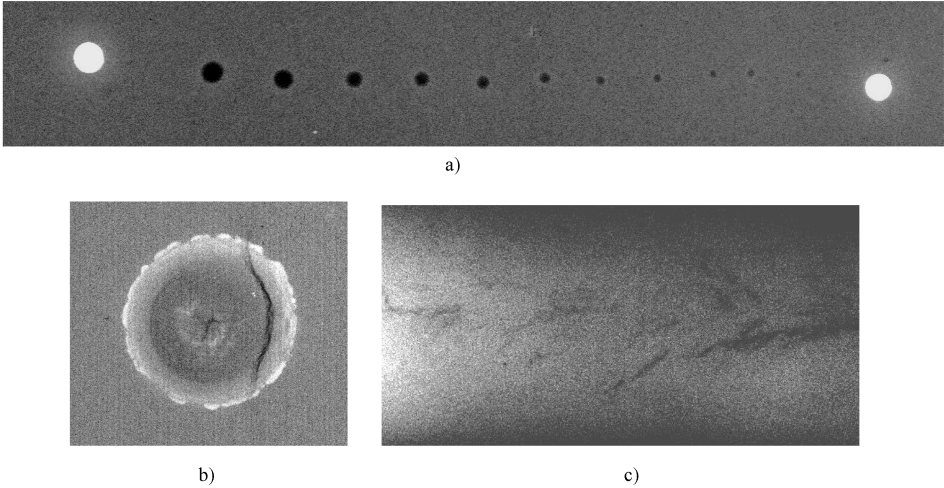


图 8-9 典型缺陷（例）
a) 人工球孔（11 个球孔，直径尺寸从 0.33mm 至 1.40mm）
b) 点焊裂纹 c) 铸钢缩孔

实验过程

(1) 透照布置

1) 在适当厚度、尺寸的同材料垫板上，放置缺陷试件、双丝像质计、线型像质计。

2) 垫板放置在 DDA 上, 并使双丝像质计长边平行于 DDA 像素行方向。

3) DDA 的像素行应平行于 X 射线管的轴线方向。

4) 射线源到 DDA 的距离: 700mm 或 1000mm。

(2) 检测图像获取

1) 对某缺陷试件, 选择适宜的管电压与管电流透照, 获得该条件下 DDA 的检测图像。

2) 更换 DDA, 保持其他透照条件不变, 获得该缺陷试件另一 DDA 的检测图像。

(3) 观察与分析检测图像

1) 从双丝像质计图像测定两幅检测图像的清晰度 (空间分辨率) 值。

2) 从线型像质计图像测定两幅检测图像的像质值 (对比度灵敏度)。

3) 观察某缺陷在不同 DDA 的显示情况 (例如, 气孔可识别数量与尺寸的变化)。

4) 用表 8-3 记录实验结果, 对实验结果进行分析、总结。

表 8-3 DDA 探测器像素尺寸对缺陷检验影响实验结果

检测图像 编号	对比项目	探测器像素尺寸, μm	
		1:	2:
	线型 IQI 值与显示		
	双丝 IQI 值与显示		
	缺陷细节显示		
	缺陷细节图像		

注: 表格可按检测图像数目设计。

实验 4 IP 板扫描读出参数对缺陷检验的影响

实验内容

采用不同类别 IP 板分别透照, 获取缺陷、双丝像质计、线型像质计的检测图像。采用不同激光扫描点尺寸读出检测图像, 比较结果。

实验器材

X 射线机 (焦点尺寸已知或测定); IP 板 (不同类别), IP 板图像读出器 (可设置不同扫描点尺寸, 如 $50\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 等); 双丝像质计 2 只。

缺陷试件: 同实验 3。

实验过程

(1) 透照布置

1) 双丝像质计和线型像质计放置在缺陷试件 (包括适当厚度垫板) 上, 双丝像质计一只平行于 IP 板边, 另一只垂直于 IP 板边。

- 2) IP 板一边应平行于 X 射线管的轴线方向。
- 3) 射线源到 IP 板的距离大于或等于 1000mm，保证几何不清晰度很小。
- (2) 检测图像获取
- 1) 对某缺陷试件，分别采用某类别的 IP 板，选择适宜的管电压、管电流、曝光时间等透照，获得该条件的检测图像，扫描读出器在不同的扫描点尺寸、相同的其他设置参数下读出检测图像。
- 2) 对某缺陷试件，采用另外类别 IP 板，重复上面试验，获取的检测图像。
- (3) 观察与分析检测图像
- 1) 观察某缺陷在不同类别 IP 板、相同透照参数和相同扫描参数下的显示情况（例如，气孔可识别数量与尺寸的变化，裂纹细节显示情况等）。
- 2) 观察某缺陷在某类别 IP 板、不同扫描参数下的显示情况（例如，气孔可识别数量与尺寸的变化，裂纹细节显示情况等）。
- 3) 测定检测图像的双丝像质计值（不清晰度，空间分辨率）和线型像质计的像质值（对比度灵敏度）。
- 4) 用表 8-4 记录实验结果，对实验结果进行分析、总结。

表 8-4 IP 板类别与扫描点尺寸对缺陷检验影响实验结果

检测图像 编号	对比项目	IP 板:		IP 板:	
		扫描点 1:	扫描点 2:	扫描点 1:	扫描点 2:
	线型 IQI 值与显示				
	双丝 IQI 值与显示				
	缺陷细节显示				
	缺陷细节图像				

注：表格可按检测图像数目设计。

8.3 数字射线检测技术的最佳（几何）放大倍数

对于数字射线检测技术，所获得检测图像的不清晰度与系统参数和技术参数相关。对某个数字射线检测技术系统，可给出检测图像不清晰度和最佳放大倍数，它们可表示为

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt[3]{[\phi(M-1)]^3 + (2SR_b)^3}$$
$$M_{op} = 1 + \left(\frac{2SR_b}{\phi}\right)^{3/2}$$

或（欧洲标准）

$$U_{im} = \frac{1}{M} \sqrt{[\phi(M-1)]^2 + (2SR_b)^2}$$

$$M_{\text{op}} = 1 + \left(\frac{2SR_b}{\phi} \right)^2$$

当采用最佳放大倍数时，检测图像的不清晰度最小。本实验验证放大倍数对检测图像不清晰度（空间分辨率）的影响。

实验 5 放大倍数对检测图像空间分辨率的影响

实验内容

获取 DDA 系统在不同放大倍数下的检测图像，采用双丝像质计测定检测图像不清晰度（空间分辨率），与理论计算结果比较。

实验器材

X 射线机，焦点尺寸 0.4mm；DDA 像素尺寸：200μm；双丝像质计与线型像质计。

垫板：常用材料适当厚度范围的平板。

实验过程

（1）准备 按上面关系式计算不同放大倍数（应包括最佳放大倍数）下获得检测图像的不清晰度值，形成表 8-5 数据表。

表 8-5 检测图像不清晰度与放大倍数关系计算数据

放大倍数 M							
立方关系计算	$U_{\text{im}} / \text{mm}$						
	双丝 IQI 值						
平方关系计算	$U_{\text{im}} / \text{mm}$						
	双丝 IQI 值						

（2）透照布置

- 1) 固定射线源与探测器间距离为 1000mm。
- 2) 双丝像质计、线型像质计固定在某适当厚度平板上（使位置、方向保持不变）。

（3）检测图像获取 对试件选择适当透照参数，改变固定有双丝像质计、线型像质计平板位置，选择表 8-5 中部分放大倍数（应包括最佳放大倍数），分别获取检测图像。

应注意实际的最佳放大倍数可能并不恰好等于计算的最佳放大倍数。

（4）观察与分析检测图像

- 1) 观察不同放大倍数下的检测图像，测定检测图像质量值。
- 2) 对双丝像质计测定的检测图像不清晰度（空间分辨率）值与理论计算结果

比较,并对结果做出分析。

8.4 ISO 17636-2: 2013 标准规定的补偿规则实验

该标准在第 7.3.2 条对补偿规则 II (CP II) 做出了具体规定。补偿规则简单概括是: 如果对于使用的探测器系统和曝光条件, 双丝 IQI 值未达到规定值, 可通过增加常规单丝 IQI 值或阶梯孔 IQI 值补偿。例如, 要求的 D12/W16 指标未同时达到, 则指标 D11/W17 可提供等价于规定的检验灵敏度要求。

必须理解, 标准中已经明确说明的, 补偿规则是通过提高检测图像信噪比来提高对比度, 并不能改变检测图像的空间分辨率。补偿规则实际是补偿因空间分辨率低造成的对比度降低的影响。

下面实验目的是理解补偿规则是通过增加曝光量提高检测图像信噪比提高对比度, 并不改变检测图像的清晰程度 (空间分辨率)。

实验 6 曝光量对检测图像质量的影响

实验内容

对某数字射线检测系统, 改变曝光量, 对放置双丝像质计与线型像质计的平板试件透照, 获取检测图像, 测定检测图像的双丝像质计与线型像质计指标。

实验器材

X 射线机, 常规焦点尺寸; DDA 像素尺寸: $200\mu\text{m}$ (或 $143\mu\text{m}$ 、 $127\mu\text{m}$ 等); 双丝像质计和线型像质计。

平板: 常用材料、适当厚度。

典型缺陷试件: 气孔; 裂纹; 缩孔等。

实验过程

(1) 透照布置

1) 按数字射线检测系统射线源特点, 选择某厚度平板, 将双丝像质计和线型像质计固定在平板上。

2) 根据平板试件材料、厚度, 选择适当透照布置, 试验中不再改变。

(2) 检测图像获取 固定透照电压, 设计一系列曝光量透照, 分别获取各曝光量的检测图像。

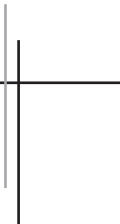
(3) 观察与分析检测图像

1) 测定检测图像的双丝像质计 (清晰程度, 空间分辨率) 和线型像质计值, 同时测定检测图像线型像质计附近固定部位的信噪比。

2) 用表 8-6 记录实验数据。若附加了缺陷试件, 可同时观察缺陷细节显示的变化情况。

3) 讨论补偿规则的作用。

检测图像序号	曝光量	检测图像测定数据				
		SNR	线型 IQI 值	双丝 IQI 值	缺陷细节显示	图像编号



附录 A 辐射探测器介绍

A.1 辐射探测器的物理基础

不同的辐射探测器基于不同的探测原理，由不同物理基础的结构部分组成。下面介绍的是常见辐射探测器的物理基础内容。

1. 能带理论

能带是描述固体中原子外层电子运动的一种图像。

按照原子理论，原子的电子只能占据某些能级，只能在特定的壳层运动。当许多原子结成固体时，其内层原子电子的运动与孤立原子时一样，但外层原子电子的运动将受到邻近原子电场的影响。例如，对于晶体，这时价电子实际上可以在原子组成的整个晶格中运动，不再被限制于某个原子，这导致电子可以具有更宽的能量范围。即，凝聚成固体后，由于原子间的相互作用，相应于孤立原子的能级将加宽成间隔极小（近似连续）的分立能级组成的能带。每一能带与原子的能级相关联，图 A-1 显示了晶格能带与原子能级的关系。

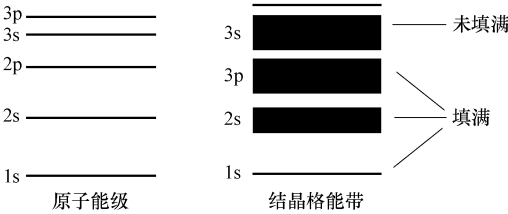


图 A-1 晶格能带与原子能级的关系

原子组成晶体后，其内层能级对应的能带也将被电子填满，一般称为满带。能量最高的价电子填满的能带（满带）称为价带，能量高于价带的能带一般是空的，一般称为空带。其中能量最低的空带称为导带。价带与导带之间的能量区称为禁带。

图 A-2 是导体能带结构的示意图。导体能带结构的一个特点是价带（最高能带）并未填满。在外电场作用下，价带上面的电子获得很少能量后，可运动到价

带内的空的状态去。即，在外电场作用下，晶体内可产生电子的集体定向运动，形成电流。实际上，大多数金属最上层的能带存在重叠。由于重叠，原填满的价带可转变为未填满，原处于导带（空带）的部分填上了电子，从而出现了更多的可供电子进入的空态，这使金属成为良导体。

绝缘体能带结构的主要的特点是价带填满，价带与导带的能量间隙较大，如图 A-3 所示。由于价带已经填满，电子不能改变其在价带中的状态，激发电子只能是把它从价带转移到导带。但由于价带与导带的能量间隙较大（例如，金刚石的能量间隙约为 6eV），外加电场无法使价带中电子加速，也就是不能产生电流。

半导体的能带结构与绝缘体的能带结构相似，主要差别是价带与导带的能量间隙较小，如图 A-4 所示。由于价带与导带的能量间隙较小，将价带中电子激发到导带比绝缘体容易，通过加热就可以把电子从价带激发到导带。导带中的少数电子可以具有金属中电子的导电作用，价带中的空穴也具有类似的导电作用。

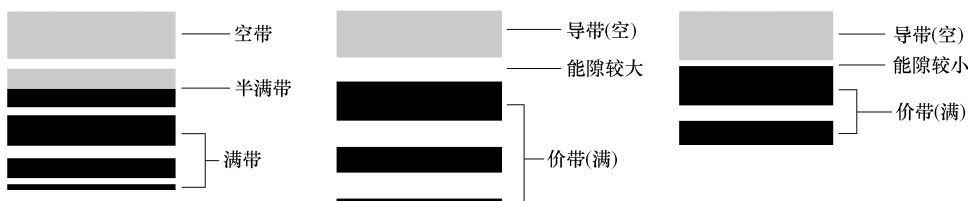


图 A-2 导体的能带结构

图 A-3 绝缘体的能带结构

图 A-4 半导体的能带结构

纯净（和结构完整）的半导体称为本征半导体。实际的半导体经常含有杂质或缺陷。一些杂质原子可以比半导体的原子具有较多的电子，这些额外电子不能容纳在原来晶体的价带中，它们将占有导带下方的某些分立能级。由于这些能级与导带的能量间隙很小（可为十分之几电子伏），电子容易被激发到导带。这类杂质原子称为施主，含有这种杂质的半导体称为 N 型半导体。相反，另一些杂质原子可以比半导体的原子具有较少的电子，它们引进空的分立能级，能级很靠近价带顶部。这使得很容易把价带中具有较高能量的电子激发到杂质能级，在价带中产生空态（空穴）。这种杂质原子称为受主，含有这种杂质的半导体称为 P 型半导体。

2. 一些相关的光电效应

辐射探测器所涉及的光电效应主要是三种：光电发射效应、光电导效应、光伏效应（或称为光生伏特效应）。

（1）光电发射效应 光电发射效应是指物质受到光照后，如果入射的光子能量足够大，则它与物质的电子相互作用可使电子逸出物质表面（向外发射电子）。其也常简单地称为外光电效应。

光电发射效应具有下面一些特点：一是对一定频谱的入射光线，光电阴极的饱和光电发射电流与阴极吸收的光通量成正比。二是发射出的光电子的最大动能随入射光的频率增高线性增大，但与光强无关。三是对某种被照射物质，只在入射光的

频率高于某个值时才会出现光电子发射，该频率值与光强度无关。上面三点，也称为光电发射三定律。

实验证明，光电发射的延迟时间不超过 $3 \times 10^{-13} \text{ s}$ 数量级。

(2) 光电导效应 光电导效应是指固体受到光照改变电导率的现象。半导体和绝缘体都有光电导效应。电导率正比于载流子与其迁移率的乘积，因此凡是能激发出载流子的入射光，都能产生光电导效应。

对于半导体，入射光可以把电子从价带激发到导带，或者使电子在杂质能级与能带间发生跃迁，增加电子和空穴浓度，从而改变了电导率。图 A-5 是半导体光电导原理示意图。

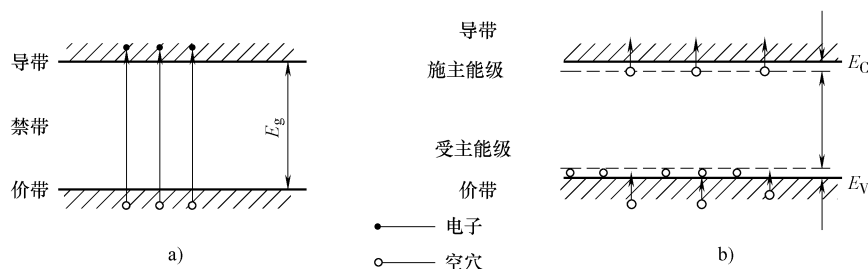


图 A-5 半导体光电导原理示意图
a) 本征型光电导 b) 杂质型光电导

产生光电导效应的基本条件是：入射光光子的能量必须不小于激发过程相应的能量间隙，也就是禁带宽度或杂质能级与某能带的能量间隙。即，光电导效应存在最大响应波长，称为光电导的长波限。

采用光电导制作光电器件时，最主要考虑的是光电导的灵敏度、弛豫时间、光谱分布。

灵敏度指一定光强下光电导的强弱，常用光电增益表示。光照射到物体后，光电导会逐渐增加，最后达到稳定。光照停止，光电导需要经过一段时间逐渐消失，这就是光电导的弛豫现象。弛豫时间是指光电导的上升时间或下降时间，也称为响应时间。弛豫时间短，则光电导反应快。显然，希望弛豫时间短。半导体的光电导与光照波长密切相关，它是半导体光电导特性的一个重要方面。只有确定了光谱分布，才能利用光电导比较不同波长的光强。

(3) 光伏效应 光伏效应（或称为光生伏特

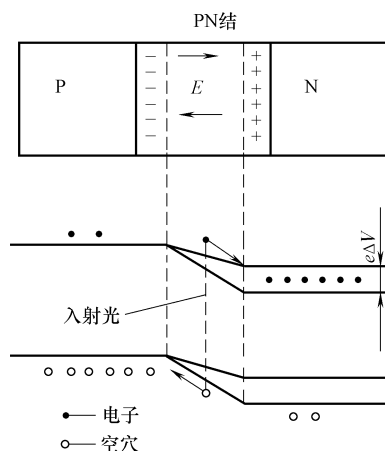


图 A-6 光伏效应示意图

效应), 是指光照引起电动势现象, 如图 A-6 所示。它可发生在半导体材料内部, 也可发生在半导体的界面。但通常, 光伏效应仅指后一种情况。

半导体界面包括: 半导体的 PN 结、金属与半导体接触的界面、不同半导体材料的异质界面、金属-绝缘体-半导体系统界面。在这些界面, 共同的特点是存在空间电荷区, 它可以建立很强的自建电场。光照时产生的电子-空穴对, 在自建电场的作用下运动。电子移向 N 区, 空穴移向 P 区, 形成光生电流。光生电流使 N 区和 P 区分别积累了负电荷和正电荷, 在 PN 结上形成电势差。

一般说, 光生电压随光强增加而增大。

3. 闪烁现象

闪烁是指高能粒子照射物体时引起瞬时闪光现象, 闪光的持续时间一般不大于 10^{-6} s。可以产生闪烁现象的物体称为闪烁体。即, 闪烁体可以吸收能量, 并把吸收的一部分能量以光的形式再发射出来。闪烁体将射线转换为荧光辐射的过程是一种光致发光过程。

无机闪烁体的发光机制由晶格的能量状态决定。按照能带理论, 电子在晶格中具有离散的能带。在价带, 电子被束缚在晶格内。在导带, 电子可以在晶体内自由运动。价带和导带之间为禁带, 对纯晶体禁带不能存在电子。在晶体内掺入杂质, 即激活剂, 可使禁带中产生一些杂质能级, 则改变了纯晶体的能级结构。

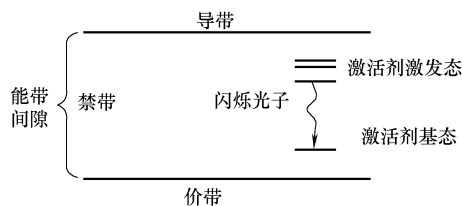


图 A-7 无机闪烁体发光过程的示意图

入射到晶体的辐射所损失的能量, 使电子从价带跃迁到导带, 在晶体中形成大量的电子-空穴对。空穴运动到激活剂, 则使激活剂处于电离状态。电子运动到电离状态的激活剂, 形成处于激发态的激活剂。激活剂直接从激发态跃迁到基态释放能量, 则形成荧光辐射。如果激活剂需要进入能量更高的激发态, 则形成磷光辐射。有机闪烁体的发光过程, 简单说是有机闪烁体的分子吸收能量后被激发到高能态, 经过无辐射退激后发生跃迁, 产生荧光辐射。如果还经过内过渡过程, 再发生跃迁, 则产生磷光辐射。图 A-7 是无机闪烁体发光过程的示意图。图 A-8 是有机闪烁体发光过程的示意图。

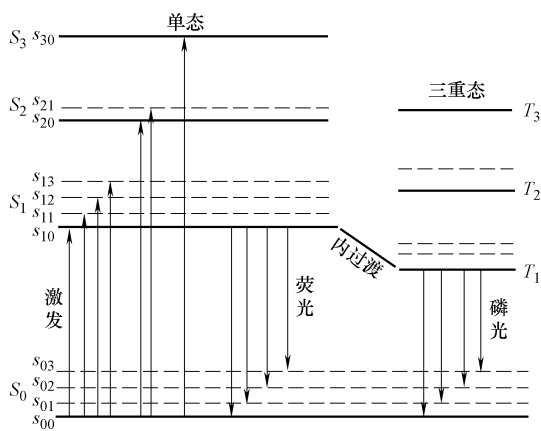


图 A-8 有机闪烁体发光过程的示意图

关于荧光与磷光概念通常也认为, 当激发停止时发射也即刻停止, 且衰退规律

关于荧光与磷光概念通常也认为, 当激发停止时发射也即刻停止, 且衰退规律

与温度无关的是荧光；当激发停止后发射体继续存留，且衰退规律与温度有关的是磷光（荧光是指激发停止后，发光持续时间小于 10^{-8} s 的发光；磷光是指激发停止后，发光持续时间大于 10^{-8} s 的发光。通常认为，某种形式的能量激发，发射体引起的电磁辐射的发射，当激发停止时发射也即刻停止，且衰退规律与温度无关的是荧光；当激发停止后发射体继续存留，且衰退规律与温度有关的是磷光）。

4. 热释电效应

在探测热辐射时，还会用到其他类型的物理效应，下面仅简单介绍热释电效应。

热释电效应是指某些晶体的电极化强度随温度变化而释放表面吸附的部分电荷。具有热释电效应的晶体称为热电体。

在热电体中，离子沿极化轴正反两个方向的配置不完全相同，由此产生电矩，导致热电体沿极化轴方向出现不等于零的宏观固有极化强度。通常情况下，晶体表面上的总电矩的正负端将吸附异性电荷，直到完全抵消总电矩产生的宏观电场。当温度变化时，极化强度改变，由此导致释放部分表面电荷。

热释电效应的大小与晶体受到的机械约束有关，典型的热电体的热释电系数（单位温度变化引起的极化强度改变量）为 10^{-5} 数量级。在恒定温度下，为产生相当于 1°C 引起的极化强度改变量，约需施加 70kV/m 的外电场。铁电体的热释电效应比非铁电体大很多。

A.2 气体探测器

气体探测器是三类（另外两类是闪烁探测器和半导体探测器）主要辐射探测器中的一类。气体探测器利用辐射对气体的电离作用实现对辐射的探测。

1. 气体探测器的原理

气体探测器的探测介质是气体，辐射与气体作用，损失的能量使气体电离，电离产生的离子对数与气体类别、辐射类型和能量相关。在气体中产生一个离子对（电子与正离子，负离子与正离子）所需要的辐射能量称为比电离能。气体种类不同，其值不同，表 A-1 是部分气体的比电离能值。对一种气体，其大体为 $25 \sim 35\text{eV}$ 。

电离产生的离子对，在电场作用下形成电离电流。测量电离电流实现对辐射的探测。

电离是一种统计过程，具有随机性，因此总的电离总是存在统计涨落，它直接影响气体探测器的能量分辨能力。电离产生的电子和正离子，除热运动外存在沿外加电场的定向漂移，存在由电子和离子密度不均匀引起的空间扩散运动，此外，还可发生电子与离子的复合。离子漂移速度正比于电场强度，反比于气体压强。电子漂移速度与电场强度和气体压强不成准确关系，但对气体成分敏感，比离子漂移速度约大 1000 倍。电子和离子的扩散，影响位置探测器的空间分辨能力。电子与离子的复合，将导致探测器输出信号幅度降低，增加脉冲上升时间。

表 A-1 部分气体的比电离能

气体	α 粒子比电离能/eV	X, γ 比电离能/eV	β 粒子比电离能/eV
He	46.0 ± 0.5	41.5 ± 0.4	$29.9 (+1.5, -0)$
Ne	36.7 ± 2.6	36.2 ± 0.4	28.6 ± 8
Ar	26.3 ± 0.1	26.2 ± 0.2	26.4 ± 0.8
H	36.2 ± 0.2	36.6 ± 0.3	—
N	36.39 ± 0.04	34.6 ± 0.3	36.6 ± 0.5
O	32.3 ± 0.1	31.8 ± 0.3	31.5 ± 2
CO ₂	34.1 ± 0.1	32.9 ± 0.3	34.9 ± 0.5
空气	34.98 ± 0.05	33.73 ± 0.15	36.0 ± 0.4

2. 气体探测器的基本结构

气体探测器的基本结构如图 A-9 所示。两个同轴电极由绝缘体分开，密封在一定气压的容器中。一个为高压电极，一个为收集电极，它们之间加上一定的高压。入射到探测器内气体的辐射使气体电离，产生电子和离子对，在电场作用下，电子和离子分别向两电极漂移，在输出回路形成电流信号。

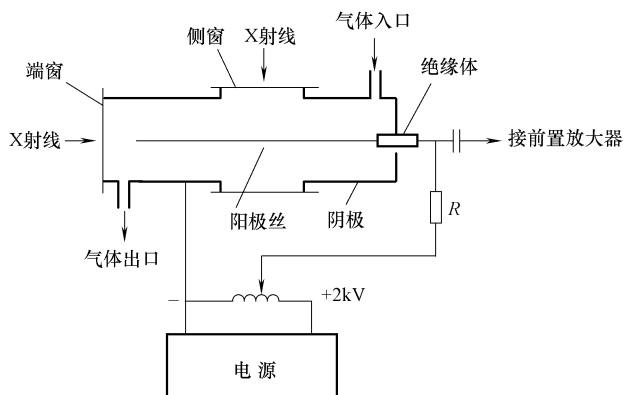


图 A-9 气体探测器的基本结构示意图

3. 气体探测器的电压-电流曲线

电离过程产生的电子，如果其能量大于电离能，在向阳极运动过程中，可以继续产生电离作用，形成二次电子。一个入射粒子的电离作用与其本身的能量相关，也与阳极和阴极间的电压相关。即气体具有放大作用。如果入射粒子数为 n ，电离最后得到的电子数为 N ，则气体的放大倍数为

$$G = \frac{N}{n}$$

在辐射强度恒定的情况下，气体探测器的放大倍数随电压变化的关系如图 A-10 所示。曲线表示的关系可以分为五个区，即未饱和区和、电离室区、正比（计数管）区、盖格（计数管）区等。

在未饱和区，由于电极间电压较低，电子与离子漂移速度小，容易发生复合。随电极间电压增加，漂移速度增大，复合减少，输出电流随电压

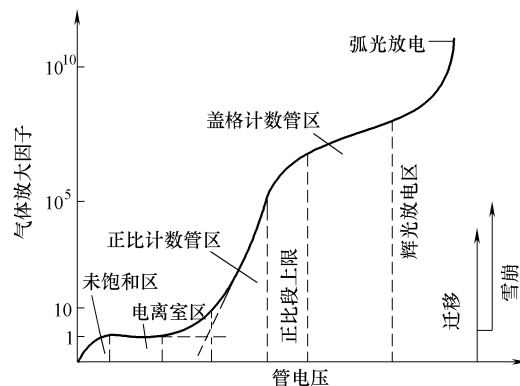


图 A-10 气体探测器放大倍数与电压的关系

升高迅速增大。这时，气体无放大作用。在电离室区，由于电极间电压较高，电场足够强，可全部收集产生的电子和离子，电子与离子的复合可忽略。电流稳定，气体的放大倍数为 1。在正比（计数管）区，电极间电压继续升高，这时，电场强度足以使二次电子引起新的电离，这使电子离子对数可增加到原电离的 10^4 倍或更大。输出的脉冲数正比于入射粒子强度。在盖格（计数管）区（或称为 G-M 区），电极间电场非常强，这时，探测器内只要有电离产生，就可引起自激放电。输出脉冲高度很大，与入射粒子种类和能量不相关。但输出脉冲数目与入射粒子数目成正比。

在各区之间都存在过渡区，过渡区不适宜作为探测计数。

4. 气体探测器的类型

气体探测器的主要类型是电离室、正比计数器和 G-M 计数器等。

电离室可分为脉冲电离室和直流电离室两类。脉冲电离室只用于测量 α 射线等比电离能较大的带电粒子。直流电离室广泛用于测量剂量与放射性强度，特别是 X 和 γ 射线的吸收剂量与照射量。

正比计数器输出脉冲大小与最初产生的离子对数成正比。利用这一性质既可区分带电粒子的种类，又可测量其能量。其输出信号一般不超过 100mV。

G-M 计数器是一种两个电极的气体放电管，其输出脉冲可高至几伏特，对 β 射线具有很高的探测灵敏度。

A.3 闪烁探测器

1. 闪烁体与光电阴极

按照闪烁体发光的特点，闪烁体可分为荧光体或磷光体。在辐射照射下约在 $1\mu\text{s}$ 或更短的时间内发射光辐射的物质称为荧光体，吸收和发射之间延迟比较长的物质称为磷光体。目前使用的闪烁体可分为两大类：无机闪烁体和有机闪烁体。无机闪烁体主要是含杂质或不含杂质的碱金属的碘化物，有机闪烁体主要是芳香族或有取代基的芳香族碳氢化合物。

也常把闪烁体进一步分为荧光物质和闪烁晶体。荧光物质常指晶态磷光体，即某些金属的硫化物、氧化物或硅酸盐等的粉末状晶体。常用的荧光物质是硫化锌镉、硫氧化钨、溴氧化镧和硫化锌等，它们的基本特性见表 A-2。常用的闪烁晶体是碘化钠、碘化铯、锗酸铋、钨酸钙和钨酸镉等，它们的基本特性见表 A-3。图 A-11 是部分荧光屏材料的发

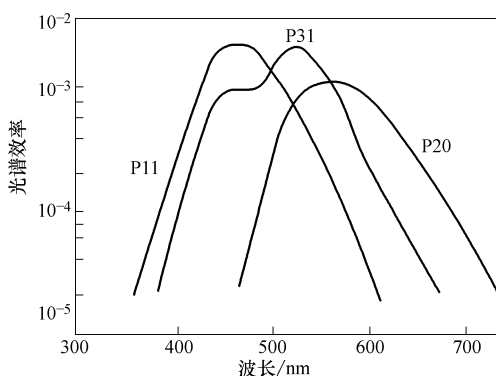


图 A-11 部分荧光屏材料的发射光谱特性
P11—ZnS(Ag) P20—ZnCdS(Ag) P31—ZnS(Cu)

射光谱特性。

表 A-2 常用荧光物质的主要特性

名称	分子式	密度/(g/cm ³)	发射峰值波长/nm	衰减常数/ns
硫化铊	ZnCdS(Ag, Ni)	4.5	540	85
硫化钨	Gd ₂ O ₂ S(Tb)	7.3	550	480 000
溴化铊	LaOBr	—	460	—
硫化铊	ZnS(Ag, Ni)	4.1	450	60

注：括号中为活化元素。

表 A-3 常用闪烁晶体的主要特性

名称	分子式	密度/(g/cm ³)	最大发射波长/nm	转换效率(%)	衰减常数/μs ^①	余辉(%/3ms)
碘化钠	NaI(Tl)	3.67	410	100 ^②	0.23	0.5~5
碘化铯	CsI(Tl)	4.51	420~570	45	1.0	0.5~5
铊酸铋	(BGO)	7.13	—	8	0.3	0.005
钨酸钙	CaWO ₄	6.12	—	50	0.5~20	1~5
钨酸镧	CdWO ₄	7.90	—	65	0.5~20	0.0005
蒽	C ₁₄ H ₁₀	1.25	450	—	0.032	—
芪	C ₁₀ H ₈	1.16	410	—	0.006	—
塑料磷光体	—	1.06	350~450	—	0.003~0.005	—
液体闪烁体	—	0.86	350~450	—	0.002~0.008	—

注：括号中为活化元素。

① 信号衰减到最大强度的 37% 所需要的时间。

② 碘化钠转换 X 射线为光的效率约为 15%，其他材料数据以其为 100%。

光电阴极（层）是一种基于外光电效应的光电发射材料，利用外光电效应通过光电阴极（层）将入射的光信号转换为电子信号。

金属光电阴极的光谱响应具有选择性光电效应特征，光电发射的量子效率都很低，多数的光谱响应都在紫外或远紫外范围。半导体光电发射的量子效率远高于金属光电发射的量子效率，而且光谱响应范围宽（尤其在红外辐射探测方面）。实用的对可见光和近红外灵敏的光电阴极，现在主要是银氧铯光电阴极（S-1）、铯铯光电阴极（S-4、S-5、S-11、S-13 等）、多碱金属光电阴极（即铯与多种碱金属的化合物，如 Sb-Na-K-Cs、Sb-K-Na-Rb-Cs、S-20、S-25 等）。

银氧铯光电阴极的主要缺点是室温下热电子发射较大，并且存在疲劳现象（即随着所用时间增长电子发射能力下降）。铯铯光电阴极是 P 型半导体，热发射低。多碱金属光电阴极的主要成分是 P 型半导体，量子效率较高，灵敏度重复性好。

2. 闪烁探测器的构成

闪烁探测器由闪烁（晶）体、电子倍增器件、电子学电路组成。图 A-12 是一种闪烁探测器的基本构成示意图。闪烁探测器的探测介质是闪烁体，其工作的基本原理是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光的形式辐射出来。对光信号实施探测，则可实现对射线的探测。

对闪烁探测器性能的主要要求是：

- 1) 闪烁效率高，即入射粒子的能量转换为可见光的份额应比较大；
- 2) 线性范围大，即输出电荷正比于射线能量的范围大；
- 3) 输出效率高，即对光的自吸收应小；
- 4) 发光衰减时间短；
- 5) 发射光谱与电子倍增器件的光谱响应匹配。

按照闪烁体的结构形状，闪烁体与电子倍增器件可以采用不同的耦合方式，如直接耦合或采用光导纤维等。

3. 典型的闪烁探测器件

(1) 光电倍增管 光电倍增管是闪烁探测器中最常用的电子倍增器件。

光电倍增管由光窗、光电阴极、电子光学系统、电子倍增系统、阳极五个主要部分组成，其结构如图 A-13 所示（一般说不包括前面的闪烁体）。

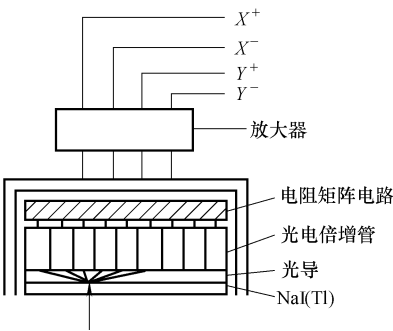


图 A-12 闪烁探测器的基本构成示意图

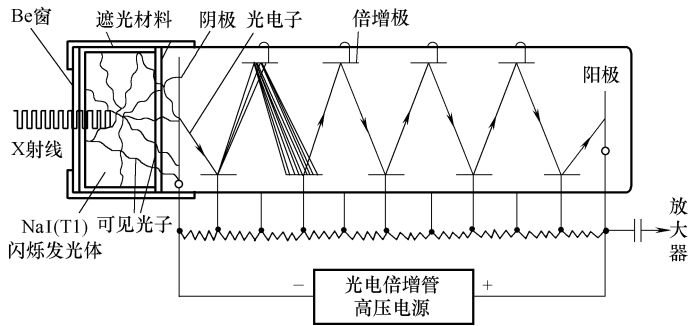


图 A-13 光电倍增管的基本构成示意图

光窗是入射光的通道，其材料决定了光电倍增管光谱特性的短波阈值。常用的光窗材料一般是钠钙玻璃、硼硅玻璃、紫外玻璃、石英等。光电阴极接收入射光，实现光电转换，发射电子。光电阴极决定了光电倍增管光谱特性的长波阈值，同时

直接决定了光电倍增管的灵敏度特性。光电阴极（层）是一种基于外光电效应的光电发射材料，利用外光电效应通过光电阴极（层）将入射的光信号转换为电子信号。常用的光电阴极材料是 Cs-Sb（铯-锑）、K-Cs-Sb（钾-铯-锑）等化合物半导体。电子光学系统主要是使前一级发射的电子在尽量短的时间全部到达下一级。电子倍增系统由多组倍增电极组成，多数为 9 ~ 14 个，其材料常是在 Ni 片上镀上 Cs-Sb。倍增电极发射二次电子，一个电子入射到倍增电极可产生 3 ~ 6 个电子，因此光电倍增管的放大倍数可达到 $10^5 \sim 10^7$ 。阳极用来收集最后一个倍增电极发射的电子。常用 Ni、Mo、Nb 等电子电离能较大的材料制作，普遍采用网状。

对光电倍增管要求的主要特性包括：

1) 光电特性，即输出电流与入射光通量之间的关系。在较宽的范围内两者为直线关系，但光通量较大时将偏离直线。一般说，光电倍增管只能测量非常小的光通量，其输出电流不能超过几毫安。

2) 光谱特性，即光电倍增管的光谱响应范围。

3) 伏安特性，即阳极电流与最后一个倍增电极和阳极间电压的关系。其基本变化规律是对于一定的入射光通量，在电压较小时，阳极电流随电压升高而增大；当电压达到一定值后，阳极电流不随电压变化，进入饱和状态。随着入射光通量增大，饱和电流值也增大。

4) 放大特性，即光电倍增管的电流放大系数（增益）或灵敏度（电流增量与光通量增量之比）随电源电压变化的关系。一般是，随电源电压增大，放大系数或灵敏度也增大。

此外，对光电倍增管还应考虑频率特性、疲乏特性、暗电流等。

(2) 微通道板（MCP） 微通道板是对二维空间分布电子进行倍增的器件。图 A-14 是微通道板的结构和工作原理示意图。

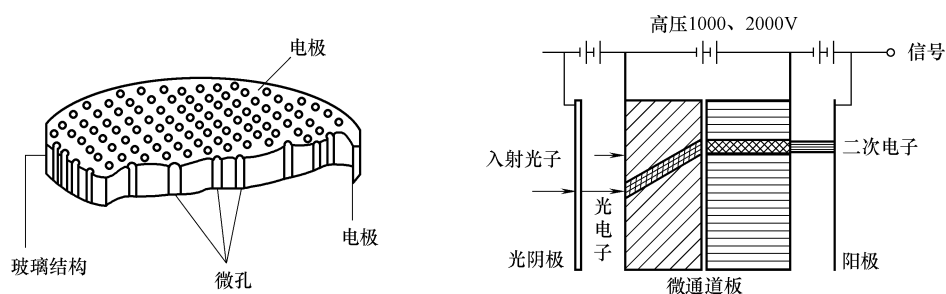


图 A-14 微通道板的结构和工作原理示意图

微通道板的基本结构是在一薄板上、沿厚度方向密布着微细通道。通道的孔径常为 $6 \sim 45 \mu\text{m}$ ，通道的长度与孔径之比的典型值为 40。通常，通道不垂直于端面，与端面成 $7^\circ \sim 15^\circ$ 的角。孔的间距尽量小，端面上的开口面积与端面的面积比多为

55% ~ 80%。在微通道板的两个端面上镀有镍层，形成输入电极和输出电极。

微通道板一般采用含铅、铋等氧化物的硅酸盐玻璃制作。其通道的内表面，经过处理（烧氢）后具有半导体和高二次电子发射特性。

微通道板各个通道独立，时间特性好、上升时间短，可用于制作成像设备。市场上的微通道板多为两层，封装在一个法兰盘中。微通道板工作在高真空和避光环境，保存时应放置在真空室或充惰性气体的容器内。

(3) 图像增强器 图像增强器的基本结构包括外壳、射线窗口、输入屏、聚焦电极、输出屏。图 A-15 是图像增强器结构示意图。

射线窗口由铝板或钛板制作，铝板的厚度一般为 0.7 ~ 1.2mm。既具有一定的强度，又可以减少对射线的吸收。输入屏主要由基板、荧光体层（闪烁体）和光电（阴极）层、隔离层构成，其结构如图 A-16 所示。基板为铝板，厚度一般约为 0.5mm。闪烁体

（输入转换屏）主要采用 CsI 晶体制做。CsI 晶体具有类似光纤的针状结构，如图 A-17 所示，它可以限制光的漫散射。单个针的直径约为 $51\mu\text{m}$ ，典型的 CsI 晶体层厚度为 $300 \sim 450\mu\text{m}$ 。光电阴极（层）为多碱金属（铯与多碱金属的化合物），厚度很小（仅为 20nm）。光电阴极（层）的灵敏度会随使用时间增加而降低。由于增强管内真空度随着时间而降低，也将影响光电阴极（层）的灵敏度，因此无论使用与否，光电阴极（层）的灵敏度都会随着时间的增加而降低。聚焦电极加有 25 ~ 30kV 的高压。输出屏的直径一般在 15 ~ 35mm 之间，多采用 P20 [即 $\text{ZnCdS}(\text{Ag})$] 荧光材料，沉积在很薄的铝膜上（200 ~ 300nm），荧光物质层厚度一般为 $4 \sim 8\mu\text{m}$ 。P20 荧光材料发射光的峰值波长为 520 ~ 540nm。

图像增强器工作的基本过程：射线透过工件，穿过图像增强器的窗口入射到输入转换屏上，输入转换屏吸收射线的部分能量，将其能量转换为荧光发射。发射的荧光被光电层接收，并将荧光能量转换为电子发射。发射的电子在聚焦电极的高压作用下被聚焦和加速，高速撞击到输出屏上。输出屏将电子能量转换为荧光发射。

图像增强器的性能直接关系到这种系统的综合性能，表 A-4 给出的是某型号图像增强器的主要性能。

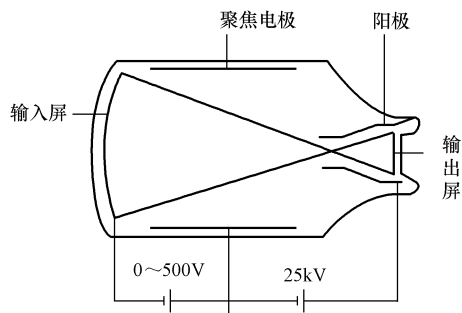


图 A-15 图像增强管结构示意图

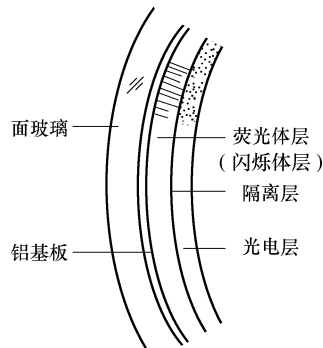


图 A-16 输入屏结构示意图

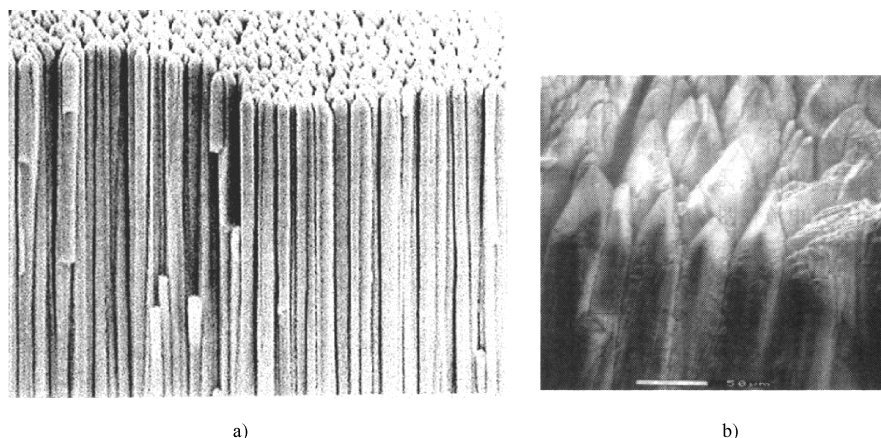


图 A-17 CsI 针状结构 SEM (电子扫描显微) 图 (右为放大图)

表 A-4 图像增强器的主要性能

输入屏直径/mm	输出屏直径/mm	中心分辨率 /(Lp/cm)	转换系数 /[(cd/m ²) / (mR/s)]	对比度比
150	15	52	140	24:1
230	20	44	140	20:1
310	25	36	140	17:1

A.4 半导体辐射探测器

1. 半导体辐射探测器的工作原理

半导体辐射探测器是一个工作在反向偏压的 PN 结二极管, 可看作是一个介质为半导体的固体电离室。在 PN 结内自建电场作用下, 电子和空穴被自建电场收集, 结区内无载流子, 形成耗尽层。耗尽层即为灵敏层 (结区), 在反向偏压作用下, 耗尽层进一步加大。当辐射入射到半导体时, 损失的能量在耗尽层产生大量电子-空穴对。在电场作用下, 电子和空穴分别向两极漂移, 在输出回路形成脉冲信号。通过检测脉冲信号实现对辐射的探测。输出脉冲的高度可判断入射光子的能量, 输出脉冲的数量可判断入射光子的数量。图 A-18 是其基本结构和工作原理示意图。

2. 半导体辐射探测器结构

目前的半导体辐射探测器, 基本结构可分为两种类型。一种是直接转换型, 另一种是间接转换型。直接转换型采用半导体将辐射转换为电信号, 再采用电信号检测部分完成对辐射的探测。间接转换型主要采用闪烁体将辐射转换为光信号, 再采用半导体将辐射转换为电信号, 最后采用电信号检测部分完成对辐射的探测。图 A-19 显示了这两种半导体辐射探测器的基本结构。

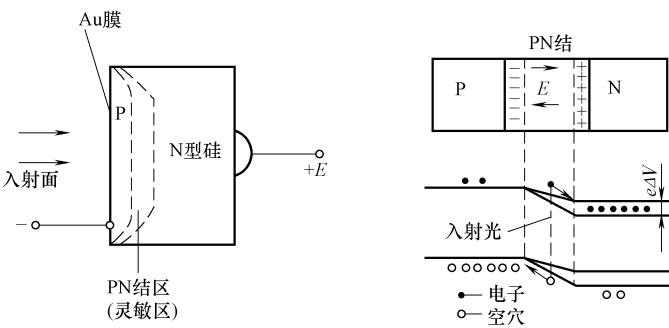


图 A-18 半导体辐射探测器的工作原理示意图

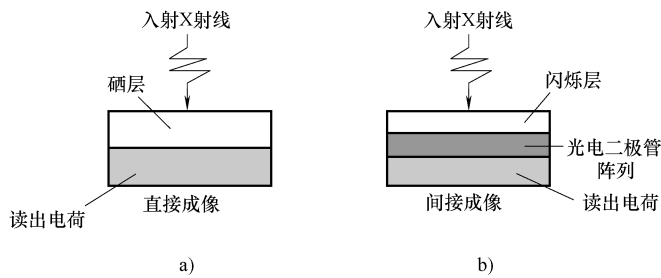


图 A-19 半导体辐射探测器的基本结构
a) 直接转换型基本结构 b) 间接转换型基本结构

直接转换型半导体辐射探测器与间接转换型半导体辐射探测器相比，其优点是减少了中间转换环节，有利于提高图像质量。图 A-20 比较了不同转换方式像元的扩展特点。但为提高对辐射的探测效率，则要求半导体探测层必须具有足够的厚度，这给制造工艺带来困难。

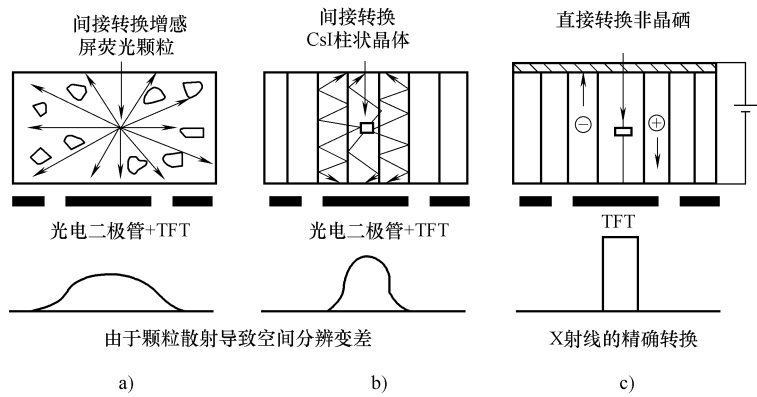


图 A-20 不同转换方式像元的扩展特点

半导体辐射探测器与其他辐射探测器比较的特点是，可直接利用电子信号、可高速读出、可精确测量能量与位置、可将探测器与读出电子电路集成在一起等。

3. 常用的半导体辐射探测器件

(1) 光电二极管 光电二极管是一类光探测器件。光电二极管的基本结构是 PN 结，其基于的是光（生）伏（特）效应。

光电二极管按照衬底材料不同可以分成两种，一种以 P 型硅作为衬底（2DU 型），另一种以 N 型硅作为衬底（2CU 型）。此外，还有 PIN 硅光电二极管和雪崩型光电二极管（APD）等不同的光电二极管。图 A-21 是以 P 型硅作为衬底的 PN 结型光电二极管的结构示意图。其基本结构是在 P 型硅表面形成重掺杂 N 型层，接触区形成 PN 结。N 型区上有 SiO_2 保护膜，引出电极。P 型区镀镍蒸铝，引出负电极。

在半导体界面存在空间电荷区，它建立了很强的自建电场。光照时产生的电子-空穴对，在自建电场的作用下运动。电子移向 N 区，空穴移向 P 区，形成光生电流。光生电流使 N 区和 P 区分别积累了负电荷和正电荷，在 PN 结上形成电势差。工作时，PN 结加反向偏压，加大耗尽层宽度和电场强度，提高光吸收效率和对载流子的收集。当反向偏压增大到一定程度时，光生电流趋向饱和，大小仅取决于光照度。在很宽的光照范围内，光电二极管可以产生与入射光强度成正比的光生电流。即，可以把光信号转变成电信号，实现对光信号的探测。图 A-22 是光电二极管工作原理示意图。

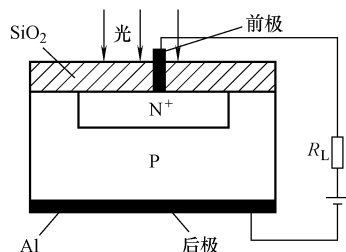


图 A-21 光电二极管结构示意图

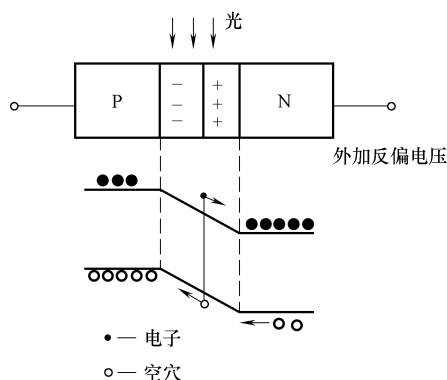


图 A-22 光电二极管工作原理示意图

(2) TFT (thin-film transistor 薄膜晶体管) TFT 的基本结构是在玻璃基板上，制作上半导体膜层，然后对膜层加工制成大规模半导体集成电路。TFT 的单元实际是一个由源极、漏极、栅极组成的三端器件。在半导体膜层两端连接的是源极和漏极，与半导体相对的位置通过绝缘膜设置栅极，利用栅极电压控制源极与漏极间的电流。

在非晶硅辐射探测器中，TFT 单元与一个光电二极管组成探测单元。TFT 实际

起像元开关的作用。

在非晶硒辐射探测器中，TFT 单元与一个电容器组成探测单元。TFT 实际起像元开关的作用。从辐射转换出的电荷积聚储存在电容上，储存电荷与入射辐射对应。读出时，施加电压信号，开关打开，电荷沿数据线流出，经放大、数字化，完成数字图像信息储存与处理。即每个 TFT 单元成为采集信息的最小单元，也即像素。

(3) CCD (电荷耦合器件) CCD 是将可见光转换为数字信号的器件。

CCD 的基本结构是密排的 MOS 二极管阵列 (MOS 电容)，即金属-氧化物-半导体构成的电容。半导体为衬底，氧化物常用 SiO_2 ，金属指栅极材料，栅极也可以是多晶硅或难熔金属的硅化物。信息是电荷量 (不是电流或电压量)，电荷量与入射光 (X 射线) 的强度成正比。因此每一 CCD 单元存储的电荷量即是潜像的一个单元。为了实现信息电荷储存，工作时 MOS 二极管将偏置到深耗尽状态。

图 A-23 是一个 MOS 电容的基本结构示意图。它以 P 型半导体 Si 作为衬底，通过氧化，在其表面形成 SiO_2 绝缘层，然后电镀上一层金属作为另一电极。半导体-绝缘体-金属形成一个电容，具有存储电荷的功能。例如，衬底半导体 Si 接地，金属电极加上正偏压，电场将排斥半导体中的多数载流子——空穴，形成耗尽区。由于在耗尽区中电子的势能较低，耗尽区成为电子的势阱。偏压越高，势阱越深，可容纳的电子越多。

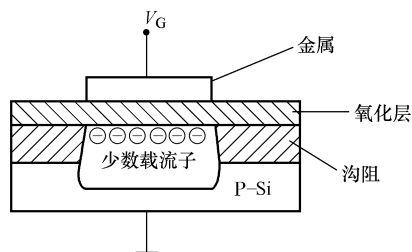


图 A-23 MOS 电容的基本结构

在光照条件下，MOS 电容衬底发生电子跃迁，形成电子-空穴对。在外电场作用下，电子和空穴分别向两极运动，形成电子电荷，即光生电荷。光生电荷存储在 MOS 电容的每个单元中。光生电荷的多少决定于射线能量和光子的数量，即每个 MOS 电容单元的电荷与图像的亮度对应。这样一来，图像就转换成了 MOS 电容的电荷分布。按一定相位顺序加上时钟脉冲时，在序列脉冲驱动下，光生电荷 (信息电荷) 将按规定方向沿衬底表面转移，形成图像视频信号。

在 Si 中造成一个电子-空穴对只需要 3.7eV 的能量，每个 CCD 像元可容纳的电子数约为 $10^6 \sim 10^7$ 个。当射线的能量较高时，CCD 像元可记录的射线光子数将受到限制。另外，高能量的射线辐照还可能损坏 CCD 芯片。因此一般采用闪烁体屏转换射线为可见光，再入射到 CCD 上。

CCD 可分为表面沟道 CCD (SCCD) 和埋沟 CCD (BCCD)。在表面沟道 CCD 中，电荷在半导体表面存储和转移。在埋沟 CCD 中，半导体表面掺有和衬底相反类型的杂质，电荷在紧靠半导体表面的内部存储和转移。

CCD 可用于摄像 (光注入)、信息处理 (电注入)、数字存储 (电注入) 等。

(4) CMOS (互补金属氧化物半导体) CMOS 在光电信号产生上与 CCD 相

同，但在构造上和信号读取上不同于 CCD，图 A-24 是 CMOS 器件像素单元基本结构。在 CCD 中，产生的信号电荷不经过放大传输到输出电路，而 CMOS 的各像素单元本身具有放大功能电路，产生的信号电荷在经过放大后传输到输出电路，使信号在传输路径中不易受到噪声影响。CMOS 各像素信号可利用选择方式取出，而 CCD 信号只能按像素排列顺序输出。但在量子效率、信噪比、暗电流等方面，CMOS 与 CCD 存在差距。

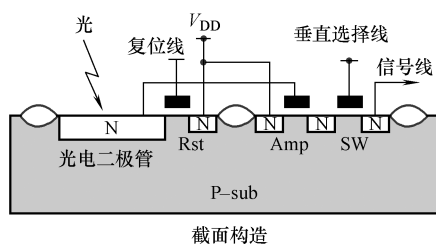


图 A-24 CMOS 器件像素单元基本结构

4. 主要的半导体辐射探测器类型

(1) 非晶硅探测器系统 非晶体也可以分为金属、半导体、绝缘体。实验证明，非晶体中每个原子周围的最邻近原子数和同质晶体一样，也是确定的，其空间排列大体保留晶体的特征，这个特点一般称为短程有序。其不同于晶体的长程有序，即非晶体的原子排列不具有周期性。短程有序决定了固体能带的基本特征，即能带的平均间距、能量状态的分布等。

非晶硅与单晶硅一样，也是半导体材料。非晶硅探测器是一种间接转换的探测器。其由闪烁体、非晶硅层（光电二极管阵列）、TFT 阵列构成。图 A-25 是非晶硅探测器结构示意图。

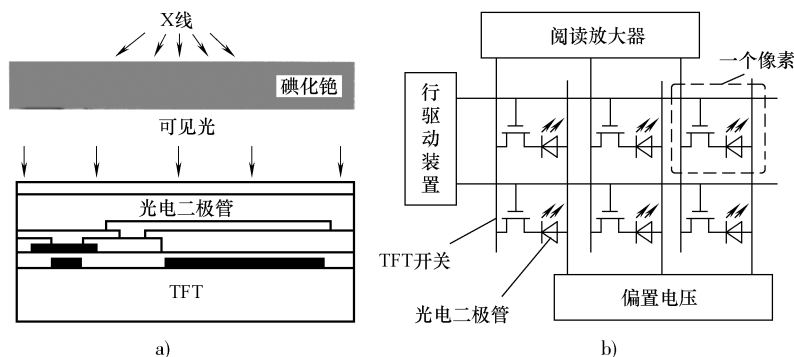


图 A-25 非晶硅探测器结构示意图

采用非晶硅探测器已经制造了平板探测器，目前，平板探测器的主要性能典型的指标如下。

- 1) 像素尺寸： $127\mu\text{m} \times 127\mu\text{m}$ ；
- 2) 动态范围：大于 2000:1；
- 3) 成像时间（包括数据修正）：5s 左右；
- 4) 适用能量范围：可达数十兆电子伏。

(2) 非晶硒探测器系统 非晶硒探测器是一种直接转换的探测器，其基本组成部分是非晶硒（作为光电材料）和薄膜晶体管阵列（TFT）。

非晶硒探测器的结构可分为四部分。一是辐射转换单元，由非晶硒作为光电转换材料，将辐射转换为电信号。二是探测器单元，每个单元包括一个电容和一个 TFT，产生的电荷积聚到电容，TFT 施加电压被激活，储存的电荷被读出。三是快速信号变化单元，其产生处理信号激活探测器单元 TFT，将产生的电信号放大并送到 A/D 转换器。四是数字图像转换单元，连续地将数字图像传送到主计算机。

当射线照射到非晶硒时，将产生电子-空穴对，在外加偏压作用下，产生的电子-空穴对向相反方向移动，形成电流。电流在 TFT 电容上积聚，形成储存电荷。每个 TFT 上的储存电荷正比于射线的照射量，顺序读出，则可获得图像。图 A-26 是非晶硒探测器成像原理图。

(3) 闪烁体结合 CCD（或 CMOS）探测器 目前，也研究和应用了采用闪烁体与 CCD 或 CMOS 结合构成的辐射探测器。其以闪烁体将辐射转换为可见光信号，采用 CCD 或 CMOS 将可见光转换为电信号，实现对辐射的探测。图 A-27 是这种线阵探测器的结构示意图。目前，工业应用的线阵探测器性能典型指标如下。

- 1) 线阵列尺寸：157 ~ 614mm。
 - 2) 像素尺寸：80μm。
 - 3) 动态范围：大于 2000:1。
 - 4) 适用能量：20 ~ 450kV。
 - 5) 寿命：10 年。
- 有报道称，可以得到更小的像素尺寸。

A.5 半导体探测器的辐射损伤

1. 半导体的辐射损伤

辐射与电子相互作用，同时也与晶格原子核相互作用。同电子作用是辐射探测的瞬时效应，同核的作用可以导致材料的永久性变化，常常可以引起探测器损伤。

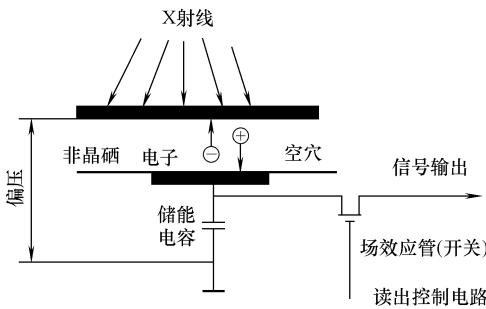


图 A-26 非晶硒探测器成像原理图

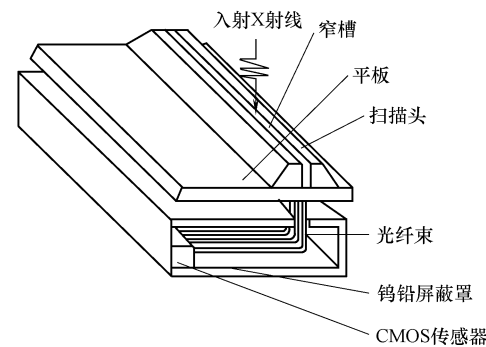


图 A-27 线阵探测器（CMOS）
的结构示意图

各种辐射对半导体造成损伤的机制主要是位移效应、电离效应、表面效应。

位移效应是指辐射与晶体原子相互作用时，使原子获得足够能量后离开晶格原来的位置。多数半导体材料晶格原子的位移阈值为 $10 \sim 25\text{eV}$ ，能量高的辐射粒子与晶格原子作用可以使原子位移，形成缺陷。这些缺陷如同复合中心，使基区少数载流子寿命减小，降低晶体管的电流增益。

不同类型辐射产生位移效应的微观过程不同，对电离辐射主要是通过库仑散射把能量交给原子，造成的位移缺陷是均匀分布的点缺陷。辐射引入的缺陷可与晶体原有的杂质等作用，形成各类形式的缺陷复合体。

电离效应是指电离辐射使半导体内产生过剩的电子-空穴对，使电导率改变，当加上电场时，这些过剩的电子-空穴对分别向正极和负极运动，形成光电流。瞬时光电流对正常工作的电路是一种扰动。

表面效应是指电离辐射在半导体表面的氧化层中产生电离，结果是使氧化层中建立正电荷并引入界面态。在氧化层中，电子的迁移率远大于空穴的迁移率。这样，在外电场的作用下，电子飘向正电极，造成正电荷总是积聚在半导体-氧化层的界面。引入界面态即是形成表面缺陷。

正电荷的建立使半导体表面反型，形成电通道，增大表面复合速度。界面态可与半导体进行电荷交换。正电荷的建立和界面态均能影响电性能，它们均不稳定。由于不同的氧化物中，电荷的运输机理不同，因此造成的损伤程度不同。表面效应过程复杂，目前在理论和实践方面都还存在需要研究的问题。

2. 半导体的辐射损伤容限

辐射对电子学系统的影响，一方面取决于辐射的种类、能量、剂量，另一方面也取决于系统采用的元器件的类型、材料、结构和电路设计。

表 A-5 为部分器件对一些辐射的损伤容限。表 A-6 是常用电子元器件的辐射损伤容限。表 A-7 是部分材料对稳定辐射的相对灵敏度。

表 A-5 部分器件对一些辐射的损伤容限

器件类型	中子（裂变）， 注量/ cm^2	γ 射线（Co-60）， 剂量/Gy	质子（约 20MeV ）， 注量/ cm^2
低功率晶体管	$10^{10} \sim 10^{11}$	$10^3 \sim 10^4$	$5 \times 10^8 \sim 5 \times 10^9$
中频晶体管（ $50\text{MC} < f_a < 150\text{MC}$ ）	$10^{12} \sim 10^{13}$	$10^3 \sim 10^4$	$5 \times 10^9 \sim 5 \times 10^{10}$
高频晶体管（ $f_a > 150\text{MC}$ ）	$10^{13} \sim 10^{14}$	$10^3 \sim 10^4$	$5 \times 10^{10} \sim 5 \times 10^{11}$
结型场效应管	$10^{14} \sim 10^{15}$	$10^4 \sim 10^5$	$10^{12} \sim 10^{13}$
NOS 场效应管	$10^{14} \sim 10^{15}$	$\approx 10^2$	$10^{11} \sim 10^{12}$
微波器件	$10^{14} \sim 10^{15}$	—	—
整流二极管	$10^{13} \sim 10^{14}$	$10^4 \sim 10^5$	$3 \times 10^{11} \sim 10^{12}$
稳压二极管	$5 \times 10^{13} \sim 5 \times 10^{14}$	$10^4 \sim 10^5$	$10^{12} \sim 10^{13}$

(续)

器件类型	中子（裂变）， 注量/cm ²	γ 射线（Co-60）， 剂量/Gy	质子（约 20MeV）， 注量/cm ²
隧道二极管	$5 \times 10^{14} \sim 5 \times 10^{15}$	$> 10^5$	$10^{13} \sim 10^{14}$
单结晶体管	$5 \times 10^{11} \sim 5 \times 10^{12}$	$\approx 10^{12}$	$10^{10} \sim 10^{11}$
晶闸管	$< 10^{13}$	< 10	—
集成电路：逻辑电路	$5 \times 10^{13} \sim 10^{15}$	$\approx 10^4$	10^{13}
集成电路：线性电路	5×10^{12}	$\approx 10^3$	$\approx 10^{11}$
集成电路：MOS 电路	5×10^{14}	$\approx 10^3$	—

表 A-6 常用电子元器件的辐射损伤容限

元器件类型	中子， 注量/cm ²	γ 射线， 剂量率/（Gy/s）	电子（1MeV）， 注量/cm ²	质子（50MeV）， 注量/cm ²
电真空器件	$10^{15} \sim 10^{17}$	10^3	—	—
充气器件	—	$10^4 \sim 10^6$	—	—
阻容器件	$10^{15} \sim 10^{16}$	$10^8 \sim 10^9$	10^{13}	10^{12}
石英晶体	$10^{13} \sim 10^{14}$	3×10^7	—	—
继电器	6.5×10^{14}	$> 10^9$	—	—
高频电缆	—	1m 长电缆芯线 感生电流： $I = 10^{-9} \cdot$ 剂量率 （A）	—	—
太阳能电池：pn 型	—	—	10^{13}	10^{11}
太阳能电池：np 型	—	—	5×10^{14}	5×10^{11}

注：太阳能电池按功率退化 50% 考虑。

表 A-7 部分材料对稳定辐射的相对灵敏度

材料类型	中子（1MeV） 注量/cm ²	电离辐射 剂量/Gy	材料类型	中子（1MeV） 注量/cm ²	电离辐射 剂量/Gy
晶体	$10^{12} \sim 10^{13}$	—	电阻材料	$10^{18} \sim 10^{21}$	$10^4 \sim 10^7$
半导体	$10^{13} \sim 10^{17}$	$5 \times 10^{11} \sim 5 \times 10^{12}$	电容器材料	—	$10^4 \sim 10^7$
有机材料	$10^{12} \sim 10^{14}$	$10^3 \sim 10^5$	迈勒薄膜	—	$10^5 \sim 10^6$
聚四氟乙烯	$10^{13} \sim 10^{14}$	$10^2 \sim 10^3$	石英	—	$10^7 \sim 5 \times 10^7$
环氧树脂	$10^{12} \sim 10^{15}$	—	云母	—	$10^7 \sim 5 \times 10^7$
橡胶	$10^{15} \sim 10^{16}$	$10^4 \sim 10^5$	玻璃	$5 \times 10^{19} \sim 10^{21}$	$5 \times 10^6 \sim 5 \times 10^7$
聚乙烯	—	$10^5 \sim 10^6$	陶瓷	$10^{19} \sim 10^{21}$ 以上	$10^7 \sim 10^8$ 以上
聚苯乙烯	$10^{16} \sim 10^{17}$	$10^4 \sim 10^7$	磁性材料	$10^{19} \sim 10^{21}$ 以上	—
金属材料	$10^{18} \sim 10^{21}$ 以上	—	—	—	—

3. 环境（空间）辐射

核爆炸会造成最恶劣的核辐射环境。核爆炸时的中子注量阈值约为 $10^{13}/\text{cm}^2$ ，可造成半导体器件永久损伤。 γ 射线对半导体器件的瞬态影响严重，它可导致系统工作状态被严重干扰，存储器中的信号会被抹掉，瞬态破坏的阈值约为 10^5 Gy/s 。此外， γ 射线还可在周围介质中激发很强的电磁场，它也对电子元器件产生瞬时或永久损伤。

外层空间辐射主要来自宇宙射线、太阳耀斑辐射、围绕地球的范·艾伦辐射带等。

范·艾伦辐射带位于赤道上空，它主要为高能质子（ $30 \sim 100 \text{ MeV}$ ）和高能电子（ $0.4 \sim 1 \text{ MeV}$ ），辐射剂量率分别可达到数十 Gy/h 和 1 Gy/h 。

太阳耀斑辐射主要为高能质子（约 30 MeV ），喷射时间可持续数百分钟至数天。

宇宙射线是高能粒子，具有极大的贯穿能力。地球卫星的电子系统，一年接受的累积剂量可达到 100 Gy 以上。

附录 B 采样定理说明

B.1 采样概念

采样是利用脉冲序列 $S(t)$ 按一定时间间隔 T_s ，从连续时间信号 $f(t)$ 抽取一系列离散样本值 $f_s(t)$ 的过程。数学上这个过程可写为两个函数相乘

$$f_s(t) = f(t)S(t)$$

$$S(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s)$$

B.2 采样定理概念

以不同的采样时间间隔抽取的离散样本值，含有的信息不同。采样定理给出的是保证离散信号和对应的模拟信号所包含的信息完全一样的条件。

B.3 采样定理讨论方法

讨论采样定理的方法是对各个函数进行傅里叶变换。各个函数的傅里叶变换频谱如图 B-1 ~ 图 B-3 所示。

从获得的各个函数的傅里叶变换频谱可以看到：抽样函数 $f_s(t)$ 的傅里叶变换频谱 $F_s(j\omega)$ 也是连续函数，是连续信号频谱 $F(j\omega)$ 按抽样角频率 ω_s 等间隔的重复。如果采样间隔不够大，采样函数 $f_s(t)$ 频谱在重复过程中，则会出现图 B-4 所示的频谱混叠现象，在混叠区将产生非原始函数的频谱成分。为避免出现混叠，必须控制采样间隔。

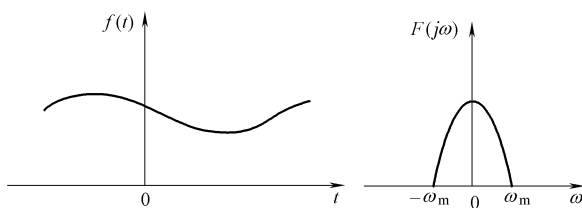


图 B-1 一维函数 $f(t)$ 与其频谱示意图

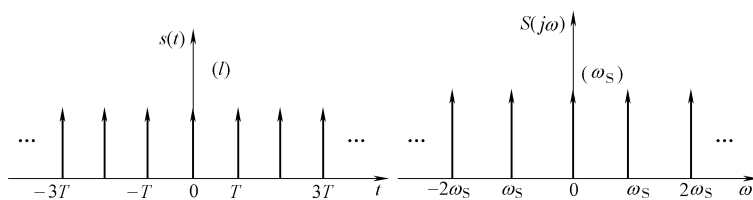


图 B-2 冲激序列函数及其频谱

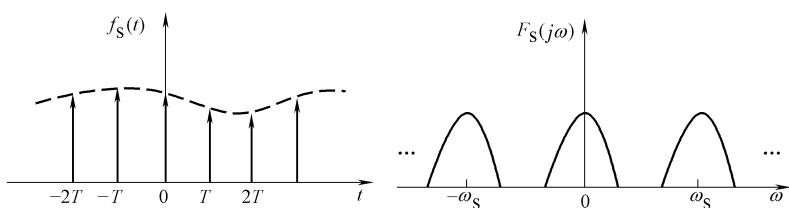


图 B-3 采样函数及其频谱

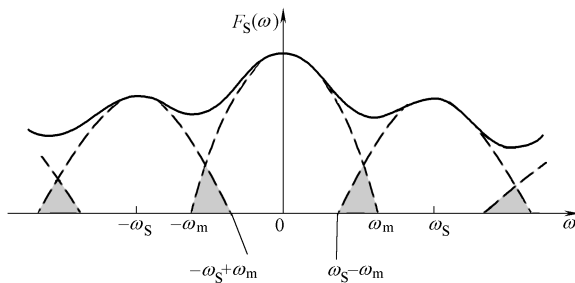


图 B-4 频谱混叠

B.4 采样定理确定方法

设连续信号的频宽（最大角频率）为 ω_m ，则其由等间隔抽样 $f(nT_s)$ 唯一确定的条件（即不发生混叠现象），按图 B-4 是

$$\omega_s \geq 2\omega_m$$

这时, 采样函数 $f_s(t)$ 的频谱可以相互独立。这样, 在恢复原始图像时, 可通过后续滤波, 获得 $-\omega_m \leq \omega \leq \omega_m$ 区单一的频谱, 则可准确、唯一地恢复原始图像信号。

从上面关系, 利用角频率与频率的基本关系式

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (T \text{ 为周期})$$

可得到

$$\begin{aligned} \omega_m &= 2\pi f_m & f_m &= \frac{\omega_m}{2\pi} \\ \omega_s &= 2\pi f_s & f_s &= \frac{\omega_s}{2\pi} & T_s &= \frac{2\pi}{\omega_s} \end{aligned}$$

这样, 简单地就可得到采样定理条件

$$f_s \geq 2f_m$$

进一步, 此式可写成

$$\frac{1}{f_s} \leq \frac{1}{2f_m}$$

也即得到了采样间隔 T_s 应满足的条件

$$T_s \leq \frac{1}{2f_m}$$

如果不满足采样定理, 则图像会出现混叠。图 B-5 显示了一些混叠图样。

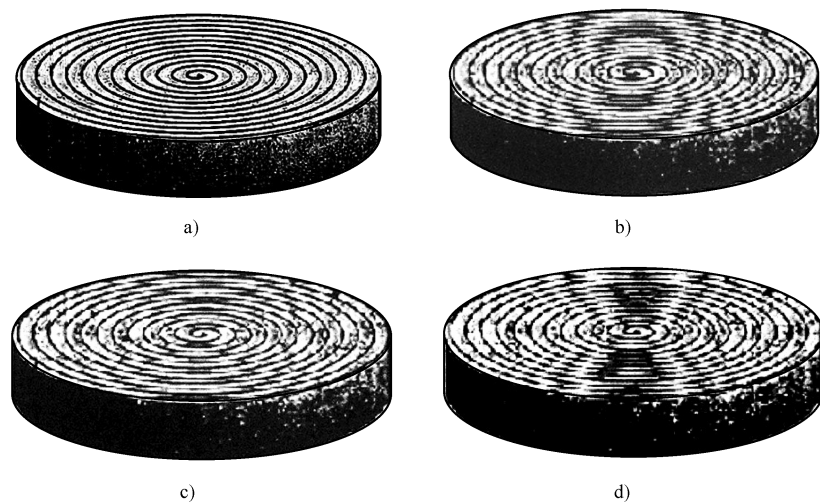


图 B-5 一些混叠图样

a) 原图像 b) 波纹状混叠图样 c) 锯齿状混叠图样 d) 波纹锯齿状混叠图样

附录 C 成像过程基本理论

成像过程基本理论是深刻理解数字射线检测技术，特别是深刻理解数字射线检测技术与胶片射线照相检测技术的等价性问题的基础。下面简要介绍有关的成像过程基本理论。后面也给出了涉及卷积和傅里叶变换的简要介绍。

C.1 成像过程概念

对于各种成像过程，从基本方面考虑可以概括为：成像系统（包括成像设备、器材和技术）对输入做出响应、给出输出的过程。图 C-1 给出了成像基本过程示意图。也就是，被观察的物空间对象作为成像系统的输入，在像空间成像系统输出获得的图像。或者说，物空间被观察对象作为成像系统的激励信号，成像系统在像空间输出的图像是成像系统对激励信号的响应。这就是对成像过程的一般性理解或概括。

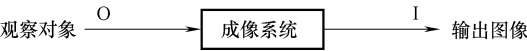


图 C-1 成像基本过程示意图

不同成像系统，由于设备、器材和技术等的差异，使成像系统具有不同特性，使成像过程具有不同特点。因此对输入信号产生不同的响应，导致输出图像质量不同。

不同成像系统具有不同的特性。其中一类系统在理论上称为线性平移不变系统，也称为线性空间不变系统，或简单地称为线性系统。简单说，线性平移不变系统具有的基本特性是：

- 第一，输入是多个信号线性和时，输出信号等于这些信号对应输出的和。
- 第二，当输入信号作坐标平移时，输出信号形式不变，仅是同时平移一定坐标。

很多实际的成像系统都是线性平移不变系统，或至少在局部成像区域内可认为是这样的系统。对这样的系统，输出信号与输入信号间将存在简单的关系。

C.2 成像过程的空间域分析

实际的成像系统由于存在的各种性能不完善，得到的像总会产生某种程度的模糊。对于某个成像系统，其成像特性集中反映在其对点物体的成像。如图 C-2 所示，成像系统对一个脉冲状的点物体，得到的像一般不是一个脉冲点像，而是呈现为具有一定分布的钟形图像。这个具有一定扩展分布像的函数，称为成像系统的点扩散（扩展）函数，或者称为成像系统的脉冲响应函数，图 C-3 是成像系统的点扩散函数的典型样式。

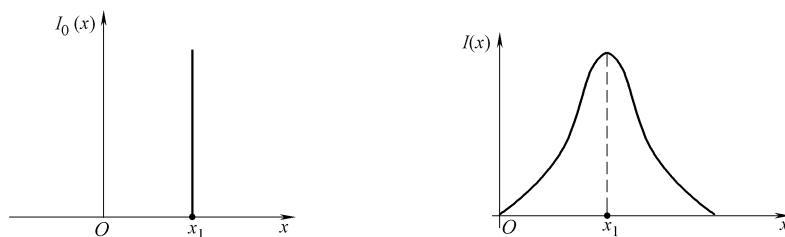


图 C-2 点物体成像的扩散

在一维空间（包括实际三维空间的线性平移不变系统），点扩散函数一般记为 $h(x)$ ，缩写时记为 PSF。成像系统性能不同，其点扩散函数不同。点扩散函数的形状和扩展宽度表征了成像系统的基本性能。简单说，点扩散函数扩展宽度越小、分布形状越尖锐，系统成像质量越好。可以认为，点扩散函数集中反映了成像系统的成像特性。

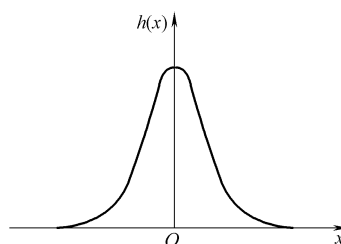


图 C-3 成像系统的点扩散函数

按照点扩散函数概念，线性平移不变系统对于物空间的一个点 $I_0(x_1)$ ，经成像系统成像后，得到的像 $I(x)$ 将由成像系统的点扩散函数 $h(x)$ 与物 $I_0(x_1)$ 决定，数学上它们的关系为

$$I(x) = I_0(x_1)h(x - x_1) \quad (C-1)$$

这时，像在空间不同点的强度将为

$$I(x_1) = I_0(x_1)h(x_1 - x_1) = I_0(x_1)h(0)$$

$$I(x_2) = I_0(x_1)h(x_2 - x_1)$$

$$I(x_3) = I_0(x_1)h(x_3 - x_1)$$

.....

如此，物空间一点经成像系统成像后，将按成像系统的点扩散函数扩展为一个区。在像分布的区中，不同点的幅度将是 $I_0(x_1)$ 与点扩散函数 $h(x)$ 在该位置点值的积。

任何物体，可看成由一系列点组成（不同点具有不同分布强度），因此线性平移不变成像系统对某物体成像时，应是各个点像的叠加和。图 C-4 给出了两物点成像的相互影响情况，示意性说明了多个点成像的叠加情况。这时像的任意点，实际将是一定范围内不同点成像的叠加结果。

当把一个小区域 Δx 看成一点时，对某点 x_i 处的像，则可写成

$$I(x_i) = I_1 + I_2 + \cdots = I_0(x_1)h(x_i - x_1)\Delta x + I_0(x_2)h(x_i - x_2)\Delta x + \cdots$$

用求和符号写出则是

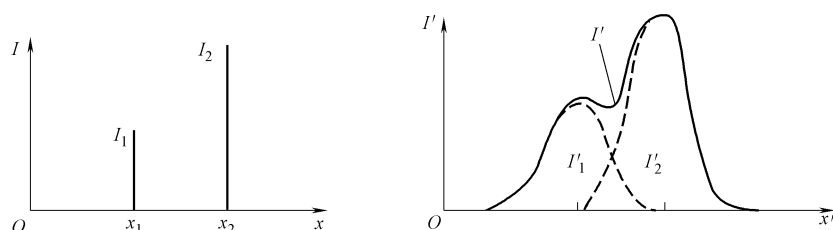


图 C-4 两物点成像的相互影响

$$I(x_i) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_0(x_n) h(x_i - x_n) \Delta x \quad (\text{C-2})$$

一般地，对于连续分布物体，可写成积分形式

$$I(x) = \int_{-\infty}^{\infty} I_0(\xi) h(x - \xi) d\xi \quad (\text{C-3})$$

式中 ξ ——积分变量。

此式在数学上表示的是，函数 $I(x)$ 等于函数 $h(x)$ 与函数 $I_0(x)$ 的卷积，卷积可用式 (C-4) 和符号 “*” 表示

$$I(x) = I_0(x) * h(x) \quad (\text{C-4})$$

由于卷积满足交换律，所以此式也可写为

$$I(x) = h(x) * I_0(x)$$

图 C-5 给出的是某成像系统对正弦信号的卷积成像过程。成像系统的点扩散函数为一门函数，图中画出了系统的点扩散函数和正弦信号的卷积过程，也可看出像点间相互影响的情况。从该图可以理解成像系统的点扩散函数表征成像系统成像特性的情况。

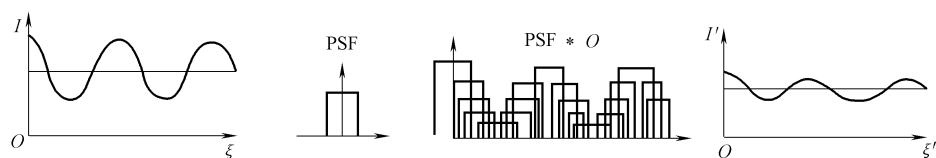


图 C-5 卷积成像过程

为便于后面的讨论，对上述讨论一般化，将线性平移不变系统的成像过程按图 C-6 所示概括。

记输入物函数为 $f(x)$ ，成像系统的点扩散函数为 $h(x)$ ，输出图像为 $g(x)$ ，则它们

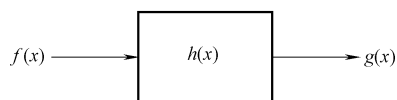


图 C-6 线性平移不变系统的成像过程

之间的关系为

$$g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) h(x - \xi) d\xi \quad (\text{C-5})$$

用卷积运算符号则可写成

$$g(x) = f(x) * h(x) = h(x) * f(x) \quad (\text{C-6})$$

即，在空间域分析成像规律时，成像是物函数与成像系统的点扩散函数的卷积过程，成像质量决定于成像系统的点扩散函数。

因此只要清楚了成像系统的点扩散函数，就可通过卷积运算给出成像系统对任何物体的输出图像，可确定成像系统对任意物体的成像情况。

C.3 成像过程的空间频域分析

上面在空间域讨论了成像系统的成像过程。更进一步地分析成像系统的成像过程特性，应转换到空间频域进行。在空间频域可以看到成像系统成像过程更多的特点，可以对成像系统、成像过程、成像质量特征作出更清晰描述。

类似于时间频率概念，对在空间按周期重复分布的对象引入空间频率概念。

例如，图 C-7a 上图给出了在空间按一定规律排布的线条，涂黑部分为线条实体，两线条间为空隙，其宽度等于线条宽度。这应是物体在空间的一种周期重复分布情况。如果用光照明该线条，理想情况可得到图 C-7a 下图所画出的光强分布，显然，其类似于电学中的矩形波电压信号，但它是在空间周期分布的信号。

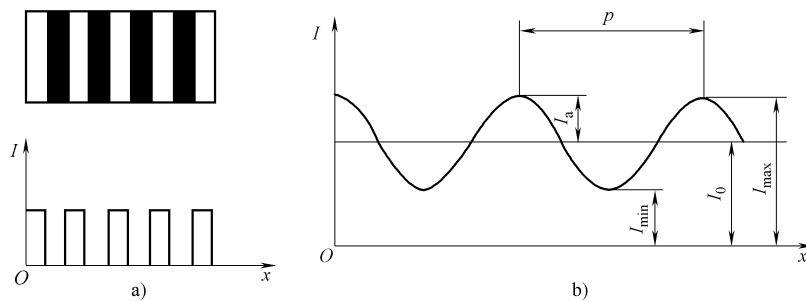


图 C-7 空间频率概念

一般地，对空间按周期重复分布的对象可转化为图 C-7b 情况描述。空间分布信号的重复间距（图中 p ）称为空间周期，单位一般用毫米（mm），单位距离内所含的周期数则称为空间频率，单位一般用“线对/毫米（ L_p/mm ）”。空间频率若记为 ν ，则其与空间周期 p 的关系为

$$\nu = \frac{1}{p}$$

这与时间频率中的关系相同。按图 C-7，空间频率可理解为单位距离内所含的线条与空隙对数，即“线对”数。

空间频率是空间频域的一个基本概念,其意义是一个细节在空间区域的重复频率。在射线检测技术中,空间按周期重复分布的典型的细节为丝(或线条)。丝(或线条)与二丝(线条)间的空隙组成线对,空隙的宽度等于丝的直径(线条宽度)。这时,空间频率为单位距离内所含的丝(线条)与空隙对数,即“线对”数。例如,丝的直径为 0.2mm 时,对应的空间频率为 2.5Lp/mm。丝的直径为 0.1mm 时,对应的空间频率为 5Lp/mm。

对空间分布信号也可引入调制度概念。调制度一般记为 M ,按图 C-7 所给符号,调制度概念定义为

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (\text{C-7})$$

从空间频率概念考虑,任何物体都可理解为包含着不同空间频率的组成部分。物体的轮廓、物体中的不同结构、物体中的细节(如存在的缺陷)等,按照它们的尺寸,可对应成不同空间频率。一般来说,物体的轮廓部分形成空间频率的低频部分,物体的不同结构部分形成空间频率的中频部分,物体的细节(如存在的缺陷)部分形成空间频率的高频部分。例如,物体内部存在的 0.2mm 宽度缺陷,对应的空间频率应为 2.5Lp/mm。

在建立了空间频率概念后,可以将成像过程转换到空间频域分析。方法是采用傅里叶变换。

按照傅里叶变换,对任意一个空间(或时间)域中 x 的函数 $f(x)$,在空间(或时间)频域(频率 ν)存在一个对应的函数 $F(\nu)$,它们的关系是

$$F(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \exp[-j2\pi\nu x] dx$$

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\nu) \exp[j2\pi\nu x] d\nu$$

从 $f(x)$ 给出 $F(\nu)$ 称为傅里叶变换,从 $F(\nu)$ 给出 $f(x)$ 称为傅里叶逆变换。它们表示,一个物理量可以在空间(或时间)域用 x 的函数 $f(x)$ 表示,也可以通过傅里叶变换在空间(或时间)频率域用 ν 的函数 $F(\nu)$ 表示。函数 $F(\nu)$ 称为函数 $f(x)$ 的频谱。通过傅里叶变换,可以简单地从空间域转换到空间频域。

对成像过程,从空间域转换到空间频域,只需要对空间域的成像进行傅里叶变换。即

$$F[g(x)] = F[h(x) * f(x)] \quad (\text{C-8})$$

按照傅里叶变换卷积定理,则应有

$$F[g(x)] = F[h(x)] F[f(x)] \quad (\text{C-9})$$

写出它们各自的具体表示式,并用各自的符号,则有

$$G(\nu) = F[g(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} g(\alpha) \exp[-j2\pi\nu\alpha] d\alpha$$

$$F(\nu) = F[f(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(\alpha) \exp[-j2\pi\nu\alpha] d\alpha$$

$$H(\nu) = F[h(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} h(\alpha) \exp[-j2\pi\nu\alpha] d\alpha$$

这时则可写出

$$G(\nu) = H(\nu)F(\nu)$$

这个关系式说明, 对于线性平移不变系统, 在空间频域, 像(输出)的频谱可以用物(输入)的频谱与系统点扩散函数的频谱的乘积表示。这时, 输出、输入都可以分解为一系列不同空间频率基元函数的线性叠加, 而且二者具有相同频率的基元函数。像频谱与物频谱的关系则可写为

$$H(\nu) = \frac{G(\nu)}{F(\nu)} \quad (\text{C-10})$$

$H(\nu)$ 称为成像系统的传递函数。即称成像系统点扩散函数的傅里叶变换为系统的传递函数。

按照傅里叶变换公式, 传递函数一般为一复数, 可以写成模与幅角积的形式, 即

$$H(\nu) = T(\nu) \exp[-j\varphi(\nu)] = T(\nu)\theta(\nu) \quad (\text{C-11})$$

式中 ν ——空间频率;

$T(\nu)$ ——调制传递因子;

$\theta(\nu)$ ——相位传递因子。

$T(\nu)$ 反映成像过程中调制度的变化, $\theta(\nu)$ 反映成像过程中相位的变化。图 C-8 示意性地显示了成像过程中调制度和相位的变化。

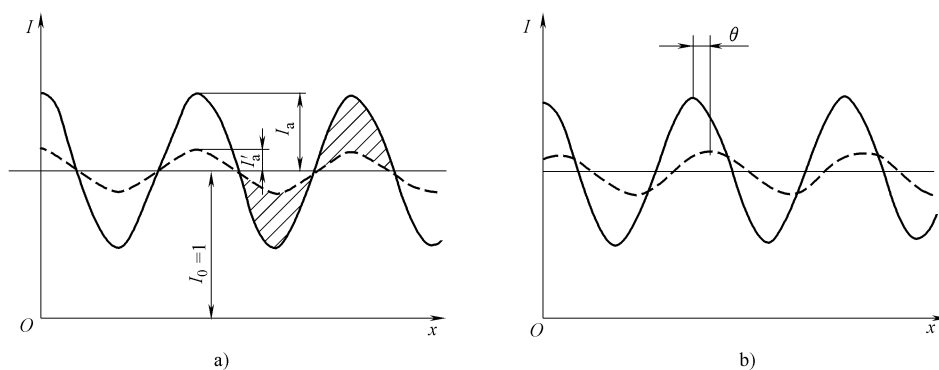


图 C-8 成像过程中调制度和相位的变化

a) 调制度的变化 (见虚线) b) 相位的变化 (见虚线)

调制传递因子 $T(\nu)$ 表示的是像的调制度 M_i 和物的调制度 M_0 的关系, 即

$$M_i = T(\nu) M_0$$

也就是

$$T(\nu) = \frac{M_i}{M_0} \quad (\text{C-12})$$

可见, $T(\nu)$ 给出了通过成像系统后, 像的调制度与物的调制度的改变关系。对于不同空间频率 $T(\nu)$ 具有不同的值, $T(\nu)$ 与空间频率 ν 的函数关系称为调制传递函数, 简记为 MTF。成像系统调制传递函数曲线的典型样式如图 C-9 所示。

由于 $T(\nu)$ 决定于成像系统点扩散函数的傅里叶变换, 因此调制传递函数也决定于成像系统的点扩散函数。

调制传递函数具体给出了成像系统对不同空间频率细节成像后调制度改变的情况。不同尺寸的细节, 具有不同的空间频率。细节尺寸越小, 对应的空间频率越高, 经成像系统成像后调制度降低越多。细小缺陷显然具有更高的空间频率, 因此成像后调制度降低将大于较大尺寸缺陷, 也就是将更难成像。由于任何接收器存在可识别的调制度阈值, 因此成像系统存在可识别的最高空间频率, 也即可识别的细节最小尺寸。

从此不难理解, 对任何检测技术, 都存在可检验的缺陷最小尺寸。

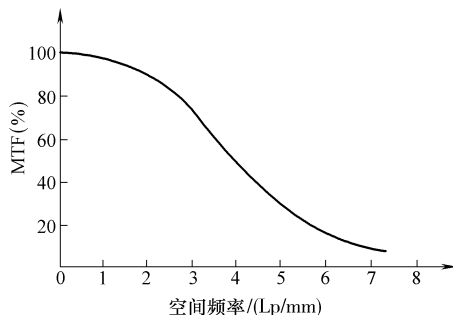


图 C-9 调制传递函数曲线的典型样式

C.4 线扩散函数、边扩散函数与不清晰度

在前面的叙述中, 一直采用一维空间, 并仅使用点扩散函数概念。在实际三维空间中, 点扩散函数应是二维函数, 这时点扩散函数可记成 $h(x, y)$ 。其图像如图 C-10 所示。对于线性平移不变系统, 由于系统的平移不变性, 点扩散函数可以写成一维形式。

在成像理论研究中, 除了点扩散函数还引入了线扩散函数 (LSF)。线扩散函数是成像系统对线物体所成的像, 也就是对线物体的响应。容易理解, 线扩散函数是点扩散函数在某方向的叠加, 图 C-11 显示了线扩散函数与点扩散函数的关系。即

$$L(x) = \int h(x, y) dy$$

显然, 它也应是一个二维函数。同样, 对于线性平移不变系统, 考虑到系统的平移不变性, 对于系统的主要成像区, 线扩散函数可以写成一维形式, 一般将其记成 $L(x)$ 。图 C-12 给出了三维空间的线扩散函数示意图。

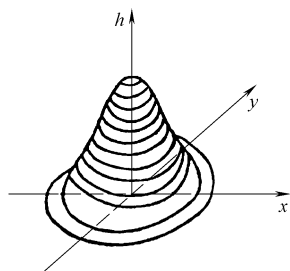


图 C-10 三维空间点扩散函数示意图

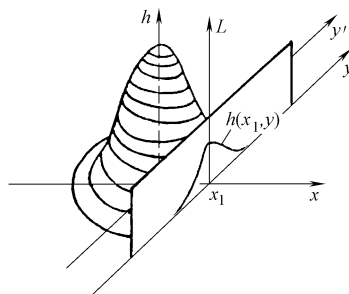


图 C-11 线扩散函数与点扩散函数关系

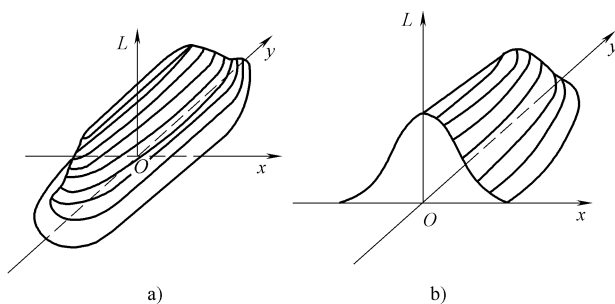


图 C-12 三维空间的线扩散函数示意图

a) 二维分布 b) 一维分布

在成像理论研究中,除了点扩散函数、线扩散函数 (LSF),还引入了边扩散函数 (ESF)。边扩散函数是成像系统对直边所成的像,也就是对直边物体的响应。对于线性平移不变系统,也可写为一维函数,记成 $E(x)$ 。线扩散函数与边扩散函数二者的关系为

$$E(x) = \int_{-\infty}^x L(z) dz$$

$$L(x) = \frac{dE(x)}{dx} \quad (C-13)$$

这样,边扩散函数与点扩散函数关系应为

$$E(x) = \int_{-\infty}^x \left[\int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) dy \right] dx = \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) dx dy$$

即,边扩散函数是线扩散函数曲线下的面积,而线扩散函数可从边扩散函数曲线的导数得到。图 C-13 画出了对应的线扩散函数和边扩散函数曲线。

在三维空间中,成像系统的传递函数理论上一般采用线扩散函数的傅里叶变换。由于线扩散函数和边扩散函数的关系,则传递函数应也可用边扩散函数表示。

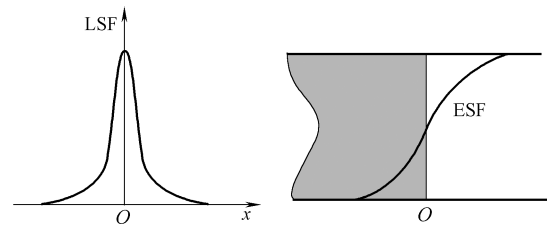


图 C-13 成像系统的线扩散函数和边扩散函数曲线

对于射线检测技术，经常使用简单的不清晰度概念，一般记为 U 。

在射线检测技术中，不清晰度概念从射线透照锐利直边获得的检测信号图像定义。这时候，获得的检测信号图像为一扩展区，扩展区的分布曲线称为不清晰度曲线，不清晰度曲线扩展区的宽度称为不清晰度。图 C-14a 显示了这种情况。

显然，不清晰度曲线实际就是边扩散函数曲线，因此不清晰度实际也就是边扩散函数的扩展宽度。由于线扩散函数为边扩散函数的导数，不清晰度也就是线扩散函数的扩展宽度。图 C-14b 显示了这种情况。

在射线检测技术中，对于实际测量不清晰度值，不同研究人员采用了不同的方法。通常的建议是用直线给出的扩展宽度作为不清晰度，该直线下的面积与复杂形状不清晰度曲线下的面积应相等，图 C-14c 显示了具体情况，图中的直线 BC 就是所采用的直线。在近似处理问题时，用该直线扩展宽度作为不清晰度，也就是用一门函数近似线扩散函数，门函数宽度现在常用 BW 表示，图 C-14b 显示了它们之间的关系。

可见，无论不清晰度的理论概念和实际测量，都显示它是边扩散函数扩展宽度的转换概念。也就是，不清晰度是相关于射线检测技术作为成像系统的扩散函数的概念。因此它成为影响射线检测技术成像系统调制传递函数的重要因素。当然，调制传递函数还与不清晰度曲线的形状密切相关。

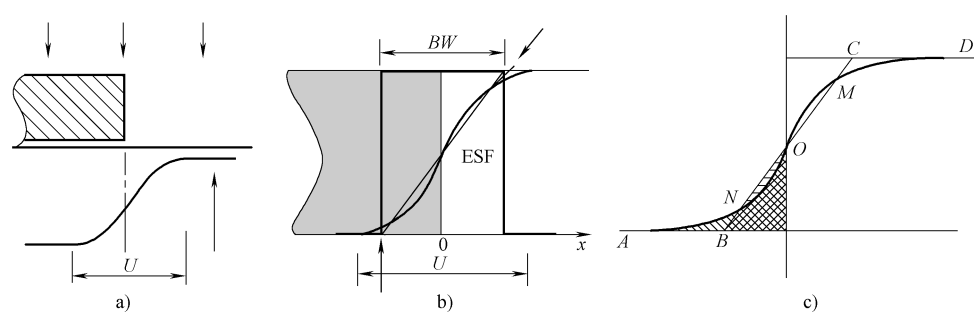


图 C-14 射线检测技术的不清晰度
a) 不清晰度定义 b) 不清晰度与边扩散函数 c) 不清晰度测定方法

以上讨论说明,射线检测技术的不清晰度,直接相关于成像系统的扩散函数、调制传递函数,所以射线检测技术的不清晰度,将直接影响射线检测技术系统对信号的调制、传递过程特性。也就是说,不清晰度将直接影响射线检测技术系统对不同空间频率细节成像的质量。

当成像系统的点(线)扩散函数采用门函数近似时,其对应的不清晰度曲线将为直线。这时,用简单的作图方法就可给出不同空间频率(宽度)细节的成像情况,包括其调制度的变化情况。图 C-15 画出的是不清晰度对细节成像的影响射线检测系统的点扩散函数为一门函数,宽度为 BW (也即其不清晰度为 BW) 时,不同宽度细节,即不同空间频率细节的成像情况。从图中可见,对大于 BW 宽度的细节,所得的像主要是展宽,不改变对比度。对小于 BW 宽度的细节,所得的像不仅展宽,而且降低对比度。对更小尺寸的细节,可以发生不能形成图像的情况。

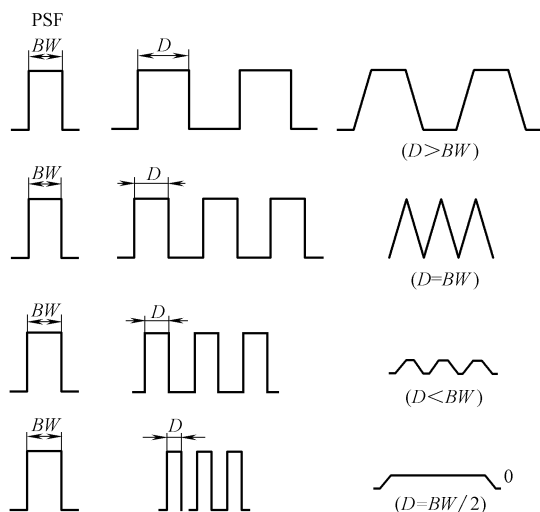


图 C-15 不清晰度对细节成像的影响

C.5 卷积概念与傅里叶变换的概念

1. 卷积运算概念

(1) 卷积定义 卷积是数学上定义的一种运算,也被称为组合乘积、叠加积分等。一般地,对两个连续函数 $f(x)$ 和 $h(x)$, 采用符号 “ $*$ ” 表示卷积运算。其定义为

$$g(x) = f(x) * h(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(z) h(x-z) dz$$

z 为积分变量。

(2) 卷积过程 从卷积的定义式可见,卷积得到的新函数在某点 x 的值,是对该 x 求出 $f(z)$ 与 $h(x-z)$ 之积,然后把这些乘积对变量 z 从 $-\infty$ 到 ∞ 积分。积分过程实际是求这时二卷积函数重合区的面积。图 C-16 给出了卷积的几何意义。

按图 C-16 卷积过程的几何意义是

- 1) 先将 $h(z)$ 关于原点 $x=0$ 折叠, 得到 $h(-z)$;
- 2) 然后将 $h(-z)$ 平移 x_0 , 得到 $h[-(z-x_0)] = h(x_0-z)$;
- 3) 将 $f(z)$ 与 $h(x_0-z)$ 相乘;

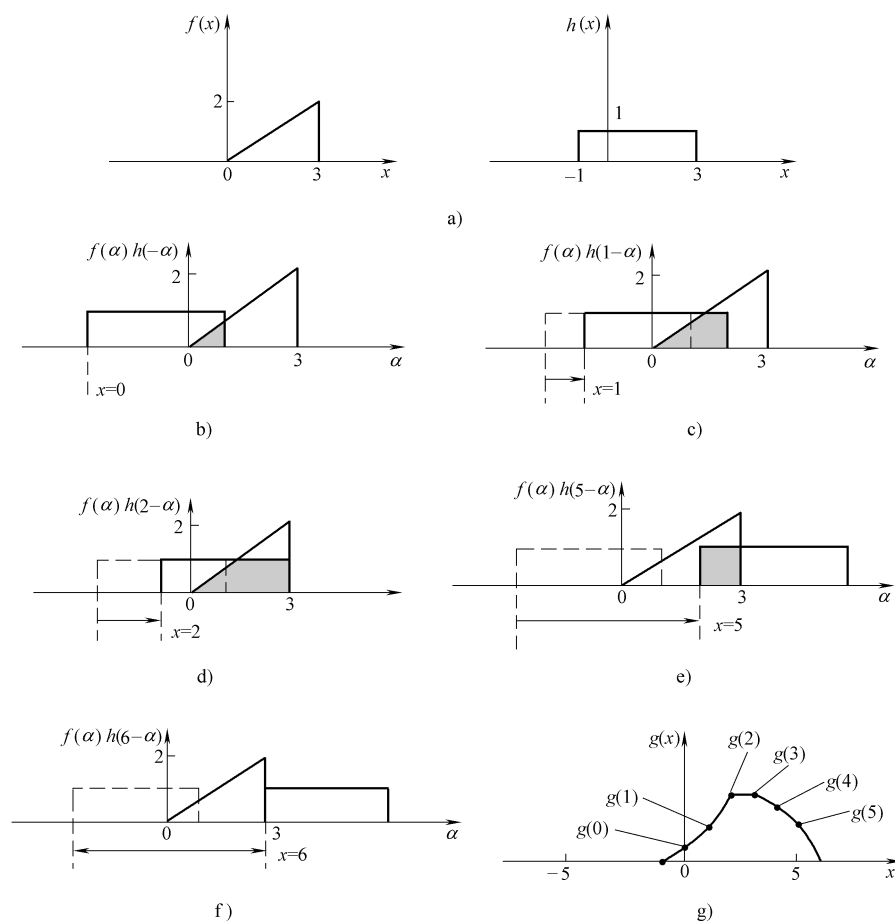


图 C-16 卷积的几何意义

a) 二个卷积函数 b) $g(0)$ 值 (图中阴影区面积) c) $g(1)$ 值 (图中阴影区面积)

d) $g(2)$ 值 (图中阴影区面积) e) $g(5)$ 值 (图中阴影区面积)

f) $g(6)$ 值 (无重合区, 为 0) g) 卷积函数 $g(x)$ 值

4) $f(z)$ 与 $h(x_0 - z)$ 的乘积对 z 积分, 得到 $g(x_0) = \int_{-\infty}^{\infty} f(z)h(x_0 - z)dz$ (即, 求二者重叠部分面积);

5) 改变 x_0 , 则可一般地写 $g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(z)h(x - z)dz$ (该面积是移动量 x 的函数)。

(3) 卷积的性质与效应 卷积的基本性质包括线性性质、交换性、平移不变性、缩放性等。在我们的讨论中, 直接需要的是卷积的交换性。该性质给出的是

$$f(x) * h(x) = h(x) * f(x)$$

其证明过程如下: 按卷积定义有

$$f(x) * h(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\alpha)h(x - \alpha)d\alpha$$

引入新变量

$$\beta = x - \alpha$$

则有

$$\alpha = x - \beta \quad d\alpha = -d\beta$$

这样可写

$$f(x) * h(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(x - \beta) h(\beta) d\beta = \int_{-\infty}^{\infty} h(\beta) f(x - \beta) d\beta = h(x) * f(x)$$

关于卷积的其他性质可参阅有关文献。

卷积运算的主要效应是平滑和展宽。平滑是指：在卷积中，被卷积函数的精细结构（如尖峰等）将被圆滑，使得到的卷积函数将比被卷积函数平滑。平滑的程度与被卷积函数的具体情况相关。展宽是指，卷积得到函数的宽度近似等于被卷积函数的宽度和。图 C-17 显示了卷积运算的平滑和展宽作用。

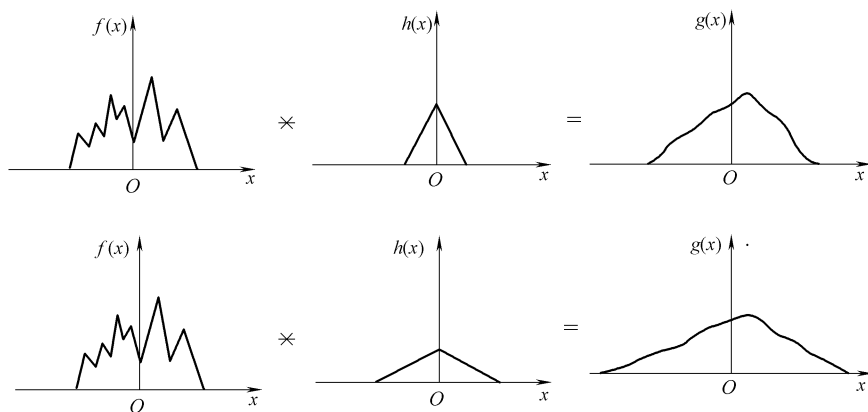


图 C-17 卷积运算的平滑和展宽作用

2. 傅里叶变换的概念

将函数（信号、图像）从一个域变换到另外一个域（例如，从时域转换到频域），在新的域中对函数进行分析和处理，可能方便或快速获取函数的某些特性。

傅里叶变换采用正弦函数和余弦函数为基本正交函数，对函数展开，给出了信号的基频、谐波幅度与相位，展开系数具有明确的物理意义。傅里叶变换又称为频域（谱）分析方法，它可以看作是时域函数转换到频域表示的方法。

下面从傅里叶级数开始，说明傅里叶变换意义。

(1) 傅里叶级数 设 $f(t)$ 是周期为 T 的周期函数，即

$$f(t) = f(t + kT) \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

则当该函数满足一定条件时，利用正弦三角函数、余弦三角函数的正交性，它可展开为傅里叶级数

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t]$$

式中 $\Omega = 2\pi/T$, 基频。

展开式中的系数 (称为傅里叶系数) 的计算式如下

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos n\Omega t dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin n\Omega t dt \end{aligned}$$

应用欧拉公式

$$e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$$

并考虑到 $\cos(-\theta) = \cos\theta$, 可写

$$\begin{aligned} \cos n\Omega t &= \frac{1}{2} [\exp(jn\Omega t) + \exp(-jn\Omega t)] \\ \sin n\Omega t &= \frac{1}{2j} [\exp(jn\Omega t) - \exp(-jn\Omega t)] \end{aligned}$$

这样, 函数的傅里叶级数展开式可改写为

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{2} [\exp(jn\Omega t) + \exp(-jn\Omega t)] + \\ &\quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n}{2j} [\exp(jn\Omega t) - \exp(-jn\Omega t)] \end{aligned}$$

记

$$\begin{aligned} F_0 &= \frac{a_0}{2} \\ F_n &= \frac{1}{2} (a_n - jb_n) \quad n = 1, 2, \dots \\ F_n &= \frac{1}{2} (a_n + jb_n) \quad n = -1, -2, \dots \end{aligned}$$

则函数的傅里叶级数展开式可进一步改写为

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n \exp(jn\Omega t)$$

傅里叶系数则为

$$F_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \exp[-jn\Omega t] dt$$

将傅里叶系数 F_n 的表示式代入函数的傅里叶级数展开式, 则函数 $f(t)$ 的傅里叶级数展开式可写成

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \exp(-jn\Omega t) dt \right] \exp(jn\Omega t)$$

即, 一个周期函数可以展开成无限多频率为其基频倍数的复正弦信号的加权和。图 C-18 给出的是一周期矩形函数的波形和其频谱 (对应的傅里叶级数展开式系数)。可见, 对周期函数, 其频谱为离散谱。频谱线的间隔与函数周期相关, 周期越长, 谱线越密集。谱线幅度按确定规律 (Bracewell 函数) 变化。

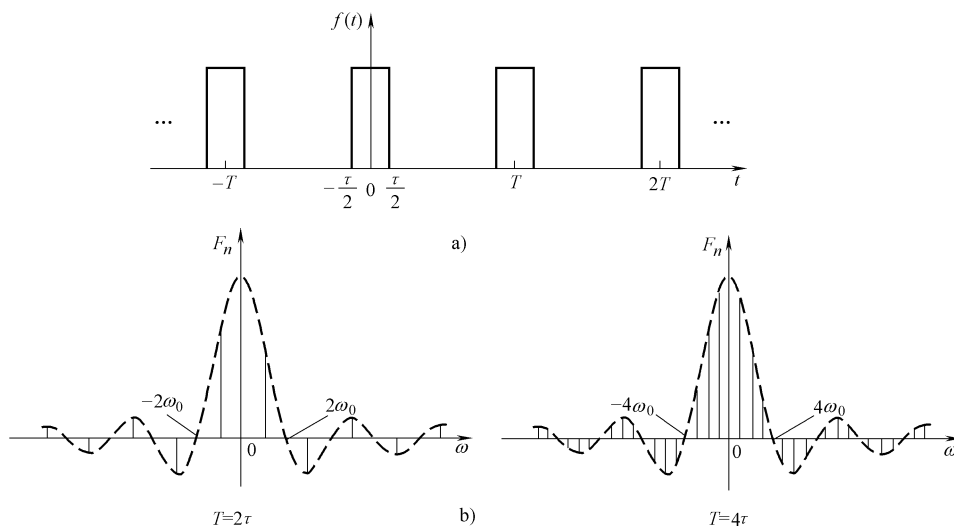


图 C-18 周期矩形函数的波形和其频谱
a) 周期矩形函数 b) 周期矩形函数的频谱

(2) 从傅里叶级数到傅里叶变换 对于非周期函数的傅里叶级数展开, 可从周期函数处理。即, 改记周期函数为

$$f_T(t) = f_T(t - kT)$$

则对非周期函数 $f(t)$ 可视为是

$$f(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} f_T(t)$$

按前面的叙述, 现在可写

$$f_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f_T(t) \exp(-jn\Omega t) dt \right] \exp(jn\Omega t)$$

因有 $\Omega = 2\pi/T$, 上式可写成

$$f_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{\Omega}{2\pi} \int_{-T/2}^{T/2} f_T(t) \exp(-jn\Omega t) dt \right] \exp(jn\Omega t)$$

当 $T \rightarrow \infty$ 时有

$\Omega = \frac{2\pi}{T} \rightarrow d\omega$, 即相邻二谱线间的间隔趋向无穷小;

$n\Omega \rightarrow \omega$, 即离散变量 $n\Omega$ 趋向连续变量 ω ;

$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \rightarrow \int_{-\infty}^{\infty}$, 即求和运算转变为积分。

这样, 则得到

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-j\omega t) dt \right] \exp(j\omega t) d\omega$$

方括号中的积分部分, 是参变量 ω (角频率) 的函数, 记为 $F(j\omega)$, 即

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp[-j\omega t] dt$$

用此记号, 则函数展开式又可写为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega) \exp[j\omega t] d\omega$$

这样就给出了非周期函数的傅里叶变换。

一个函数 $f(t)$ 的傅里叶变换以前常简单地记为

$$F[f(t)] = F(u)$$

其中 u 为频率域变量 (也可用其他符号), 现在部分教材中记为

$$F[f(t)] = F(j\omega)$$

这时赋予“ $F[\]$ ”为对函数进行傅里叶变换运算的含意。

傅里叶变换的意义是: 它说明非周期函数也可以展开为简谐函数的叠加, 但不再是谐波的叠加, 而是角频率连续变化的无穷多个简谐函数的叠加。即, 非周期函数可以由无穷多个指数函数 $\exp(j\omega t)$ 之和表示, 每个指数函数分量的大小为 $F(j\omega)$ 。

$F(j\omega)$ 简单称为函数 $f(t)$ 的频谱函数 (实际称为频谱密度函数), 也即函数 $f(t)$ 的傅里叶变换。它一般为一复数, 可写为

$$F(j\omega) = |F(j\omega)| \exp[j\varphi(\omega)]$$

其模 $|F(j\omega)|$ 为函数 $f(t)$ 各频率分量的相对大小, 幅角 $\varphi(\omega)$ 为函数 $f(t)$ 各频率分量的相位。一般将 $|F(j\omega)|$ 与 ω 的关系曲线称为函数信号的幅度频谱, 将 $\varphi(\omega)$ 与 ω 的关系曲线称为函数信号的相位频谱。图 C-19 显示的是矩形 (脉冲) 函数的傅里叶变换频谱曲线。

(3) 傅里叶变换卷积定理 傅里叶变换卷积定理分为两个方面: 时域卷积定理、频域卷积定理。时域卷积定理给出两个函数卷积的傅里叶变换表示式, 频域卷积定理给出两个函数乘积的傅里叶变换表示式。

时域卷积定理: $F[f(t) * g(t)] = F[f(t)] F[g(t)]$

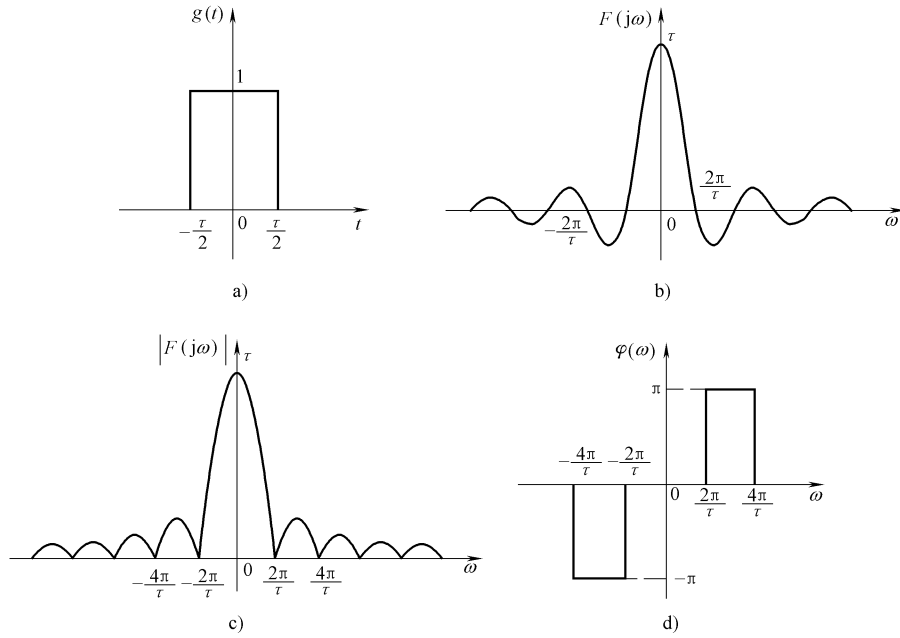


图 C-19 矩形 (脉冲) 函数的傅里叶变换频谱曲线

a) 门函数 b) 门函数的频谱 c) 门函数的幅度谱 d) 门函数的相位谱

频域卷积定理: $F[f(t)g(t)] = \frac{1}{2\pi}(F[f(t)] * F[g(t)])$

下面给出两卷积定理证明 (详细过程见相关文献)。

按卷积运算定义, 有

$$f(t) * g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t - \tau) d\tau$$

因此有

$$F[f(t) * g(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t - \tau) d\tau \right] \exp[-j\omega t] dt$$

$$F[f(t) * g(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \left[\int_{-\infty}^{\infty} g(t - \tau) \exp[-j\omega t] dt \right] d\tau$$

按傅里叶变换的平移(时移)性质

$$F[f(x - x_0)] = F[f(x)] \exp[-j\omega x_0]$$

则有

$$\int_{-\infty}^{\infty} g(t - \tau) \exp[-j\omega t] dt = F[g(t)] \exp[-j\omega \tau]$$

这样就可得到时域卷积定理结果

$$F[f(t) * g(t)] = F[f(t)]F[g(t)]$$

关于频域卷积定理可如下证明。为方便,分别记

$$F[f(t)] = F_1(j\omega)$$

$$F[g(t)] = F_2(j\omega)$$

则可写

$$F[f(t)] * F[g(t)] = F_1(j\omega) * F_2(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} F_1(j\xi)F_2[j(\omega - \xi)]d\xi$$

按函数 $f(t)$ 与函数傅里叶变换 $F[f(t)]$ 的关系,从频域卷积定理给出的结果求函数的表示式。即,对应的函数表示式应为

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_1(j\xi)F_2[j(\omega - \xi)]d\xi \right] \exp[j\omega t]d\omega = \\ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_1(j\xi) \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_2[j(\omega - \xi)] \exp[j\omega t]d\omega \right] d\xi \end{aligned}$$

利用傅里叶变换的频移性质,可得到

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_2[j(\omega - \xi)] \exp[j\omega t]d\omega = g(t) \exp[j\xi t]$$

将其代入上面的表示式,则可写出

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_1(j\xi)g(t) \exp[j\xi t]d\xi = \\ g(t) \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_1(j\xi) \exp[j\xi t]d\xi = g(t)f(t) \end{aligned}$$

这样就证明了傅里叶变换频域卷积定理。

(4) 傅里叶变换的另一种表示式 以上,对频域均采用了角频率变量 ω 给出傅里叶变换的表示式。傅里叶变换的表示式也可采用一般的频域频率变量表示。例如采用频率变量 u (或 v 等),这时,由于两个频率变量间有关系

$$\omega = 2\pi u$$

则函数的傅里叶变换式应改写成

$$\begin{aligned} f(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} F(u) \exp[j2\pi ut]du \\ F(u) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp[-j2\pi ut]dt \end{aligned}$$

3. 欧拉公式与证明

欧拉公式的常用表示式为

$$e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$$

它给出了以 e 为底的复指数函数与三角函数间的关系,欧拉公式可采用泰勒展开进

行证明。下面是证明的简要过程。

按泰勒级数展开三函数, 得到

$$\begin{aligned} e^x &= 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \cdots + \frac{x^n}{n!} + \cdots \\ \sin x &= x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \cdots + (-1)^{n-1} \frac{x^{2n-1}}{(2n-1)!} + \cdots \\ \cos x &= 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \cdots + (-1)^n \frac{x^{2n}}{(2n)!} + \cdots \end{aligned}$$

注意到

$$j = \sqrt{-1}, j^{4n+1} = j, j^{4n+2} = -1, j^{4n+3} = -j, j^{4n} = 1$$

则立即可得到

$$\begin{aligned} e^{jx} &= 1 + jx + \frac{(jx)^2}{2!} + \frac{(jx)^3}{3!} + \frac{(jx)^4}{4!} + \frac{(jx)^5}{5!} + \cdots \\ e^{jx} &= 1 + jx - \frac{x^2}{2!} - j \frac{x^3}{3!} + \frac{x^4}{4!} + j \frac{x^5}{5!} + \cdots \\ e^{jx} &= \left(1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \cdots \right) + j \left(x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \cdots \right) = \cos x + j \sin x \end{aligned}$$

附录 D 部分复习参考题答案[⊖]

第 1 章 复习参考题答案

一、选择题

1. A 2. A 3. C 4. A 5. B 6. B 7. A 8. B 9. D
10. C 11. B 12. D 13. C 14. D

二、判断题

1. × 2. ○ 3. × 4. ○ 5. × 6. × 7. × 8. ○

三、计算题

1. 0.014 d^{-1} 2. 2.3 倍

第 2 章 复习参考题答案

一、选择题

1. D 2. A 3. D 4. A 5. C 6. B 7. A 8. A 9. B
10. B 11. B 12. D

⊖ 问答题均略掉, 未给出答案。

二、判断题

1. ○ 2. ○ 3. ○ 4. ○ 5. × 6. × 7. ○ 8. ○ 9. ×
10. ○ 11. × 12. × 13. ○ 14. × 15. ○ 16. ○

第3章 复习参考答案

一、选择题

1. D 2. C 3. C 4. B 5. D 6. D 7. D 8. D

二、判断题

1. ○ 2. ○ 3. ○ 4. × 5. ○ 6. ○ 7. ○ 8. × 9. ○
10. ○ 11. ○ 12. ○

三、计算题

1. $125\mu\text{m}$ 2. 0.3271mm , 约 3.0Lp/mm

第4章 复习参考答案

一、选择题

1. D 2. C 3. A 4. B 5. D 6. D 7. C 8. A 9. C
10. D

二、判断题

1. ○ 2. ○ 3. ○ 4. ○ 5. ○ 6. × 7. ○ 8. ○ 9. ×
10. ○

三、计算题

1. 2 2. 0.2994mm , 约 3.3Lp/mm

第5章 复习参考答案

一、选择题

1. C 2. B 3. B 4. C 5. B 6. C 7. A 8. B 9. D
10. A

二、判断题

1. ○ 2. × 3. ○ 4. × 5. × 6. ○ 7. ○ 8. ○ 9. ○
10. ○ 11. ○ 12. ○

三、计算题

1. $130\mu\text{m}$, 1.52 2. 近似 0.4mm 3. $8.2\mu\text{m}$

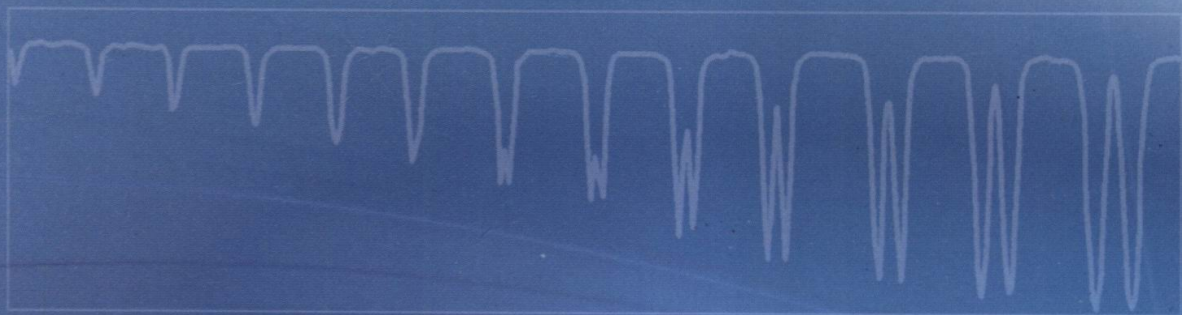
参考文献

- [1] 王之江, 伍树东. 成像光学 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [2] J D 加斯基尔. 线性系统·傅里叶变换·光学 [M]. 封开印, 译. 北京: 人民教育出版社, 1981.
- [3] 麦伟麟. 光学传递函数及其数理基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [4] 母国光, 战元龄. 光学 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [5] 谢敬辉, 廖宁放, 曹良才. 傅里叶光学与现代光学基础 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.
- [6] Mark Owen. 实用信号处理 [M]. 邱天爽, 李丽, 赵林, 译. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [7] 江志红. 深入浅出数字信号处理 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
- [8] 谷口庆治. 数字图像处理: 基础篇 [M]. 朱虹, 等译. 北京: 科学出版社, 2002.
- [9] 王应生, 徐亚宁, 等. 信号与系统 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [10] 吴湘淇. 信号与系统 [M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [11] 杨忠根, 任蕾, 等. 信号与系统 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [12] 范世贵, 李辉. 信号与线性系统 [M]. 2 版. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
- [13] 潘双来, 邢丽东. 信号与线性系统 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [14] 狄长安, 陈捷, 等. 工程测试技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [15] 邱德润, 陈日新, 等. 信号、系统与控制理论: 上册 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2009.
- [16] 蒋刚毅, 杭国强, 等. 信号与线性系统 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [17] 刘文耀. 数字图像采集与处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [18] 阎敬文. 数字图像处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [19] 刘纪红, 孙宇舸, 等. 数字信号处理原理与实践 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [20] 韩晓军. 数字图像处理技术与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [21] 刘直芳, 王运琼, 等. 数字图像处理与分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [22] 汪贵华. 光电子器件 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [23] 邹昇松. 电真空成像器件及理论分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [24] Gerhard Lutz. 半导体辐射探测器 [M]. 刘忠立, 译. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [25] 曾树荣. 半导体器件物理基础 [M]. 2 版. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- [26] 安毓英, 等. 光电子技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [27] 王庆有. 光电技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [28] 江文杰, 等. 光电技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [29] 曾光宇, 等. 光电检测技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [30] 宋丰华. 现代光电器件技术及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [31] 杨永才, 等. 光电信息技术 [M]. 上海: 东华大学出版社, 2002.
- [32] 张广军. 光电测试技术 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2003.

- [33] Dr R Halmshaw , Dr JNA Ridvard. A review of digital radiological methods [J]. Brit J NDT, 1990, 32 (1): 17.
- [34] C G Pollitt. Radiographic Sensitivity [J]. Brit J NDT, 1962, 4 (3): 71-77.
- [35] E L Criscuolo. Correlation of radiographic penetrameters [J]. Materials research & standards, 1963, 3 (6): 465-471.
- [36] E L Criscuolo. Radiography and visual perception [J]. Nondestructive testing, 1962, 20 (6): 373-401.
- [37] Halmshaw R. Industrial Radiology : Theory and Practice [M]. New Jersey: Applied Science Publishers LTD , 1982.
- [38] 石井勇五郎. 无损检测学 [M]. 吴义, 等译. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [39] 郑世才. 射线实时成像检验技术与射线照相检验技术的等价性讨论 [J]. 无损检测, 2003, 25 (10): 500-503.
- [40] Uwe Zscherpel, Uwe Ewert and Klaus Bavendiek, Possibilities and limits of digital industrial radiology-The new high contrast sensitivity technique-Examples and system theoretical analysis, International symposium on digital industrial radiology and computed tomography, June 25-27, 2007, Lyon, France.
- [41] K Bavendiek, U Heike, W D Meade, et al. New digital radiography procedure exceeds film sensitivity considerably in aerospace application. 9th ECNDT, Berlin, 25-29, 9, 2006, Proceeding-sCD, NDTNETpublication. [http: //www. ndt. net/article/ecndt2006/doc/TH. 3. 2. 1. pdf](http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/TH.3.2.1.pdf).
- [42] J Sekita, Industrial X-ray radiography in Japan [J]. INSIGHT, 1998, 40 (4): 255-259.
- [43] 郑世才. 数字射线无损检测技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [44] 丁富荣, 等. 辐射物理 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2004.
- [45] 曹建中. 半导体材料辐射效应 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [46] 罗文宗, 等. 放射化学分析 [M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [47] 江藤秀雄, 等. 辐射防护 [M]. 崔朝晖, 译, 北京: 原子能出版社, 1986.
- [48] 赖祖武, 等. 抗辐射电子学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [49] 袁汉鎔, 等. 物理学词典: 原子核物理学分册 [M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [50] 马礼敦. 近代 X 射线多晶体衍射 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [51] 李景镇. 光学手册 [M]. 2 版. 西安: 陕西科技出版社, 2010.
- [52] 金伟其, 胡威捷. 辐射度 光度与色度及其测量 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- [53] 于军胜. 显示器件技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [54] Dan Gookin. 数字扫描与照相 [M]. 范彦, 译. 北京: 北京大学出版社, 2002.
- [55] 牟书海, 张磊, 等. 扫描仪使用与维修 [M]. 北京: 新时代出版社, 2000.
- [56] 余东峰, 王连成, 等. 数码影像硬件工厂 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.

本书特色

- 精心设计的实验项目和复习参考题，让您学习、考证更容易。
- 大量实际技术处理内容，让您工作更顺手。
- 理论知识浅显易懂，让您轻松掌握。



地址：北京市百万庄大街22号

邮政编码：100037

电话服务

服务咨询热线：010-88361066

读者购书热线：010-68326294

010-88379203

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

金书网：www.golden-book.com

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版



机械工业出版社微信服务号 请关注科技有的聊微信公众号



上架指导 工业技术 / 检测技术

ISBN 978-7-111-48718-0

策划编辑◎吕德齐

ISBN 978-7-111-48718-0



9 787111 487180 >

定价：49.00元