

浅谈 CR 检测中的分辨力与分辨率

陈小明,石爱玲,张军辉,吴志波,谭云华

(东方电气集团东方锅炉股份有限公司,自贡 643000)

摘要: 现行 CR 检测标准中涉及多个有关分辨力和分辨率的术语,如分辨力、分辨率、图像分辨率、系统分辨率和扫描分辨率等,容易混淆。通过理论分析、试验和实际应用几个方面入手,阐明其间的内在联系和区别,以为从业人员学习与应用 CR 检测技术提供帮助。

关键词: CR 检测;数字图像;分辨力;分辨率

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号:1000-6656(2020)02-0017-04

The resolution and resolution ratio in CR testing

CHEN Xiaoming, SHI Ailing, ZHANG Junhui, WU Zhibo, TAN Yunhua

(Dongfang Boiler Co., Ltd., Dongfang Electric Group, Zigong 643000, China)

Abstract: There are many terms related to resolution and resolution ratio in current CR testing standards, such as resolution, resolution ratio, image resolution ratio, system resolution ratio and scanning resolution ratio, which are easy to cause confusion and misunderstanding. This paper intends to clarify the internal relationship and difference between them through theoretical analysis, experiments and practical application, so as to provide some help for the theoretical study of digital ray practitioners and the application of CR testing technology.

Key words: CR testing; digital image; resolution; resolution ratio

随着特种设备行业射线数字成像标准发布和人员取证的实施,数字射线检测技术得到了大力的推广应用。由于各标准的发布时间、起草人员不同,标准中的术语也就略存在差异,易引起混淆。特别是 X 射线计算机辅助成像检测(简称 CR 检测)标准,存在多个有关分辨力和分辨率的术语,给数字射线从业人员在学习、理解和应用标准上带来很大的困难。

笔者通过对标准 NB/T 47013.11—2015《承压设备无损检测 第 11 部分:X 射线数字成像检测》、NB/T 47013.14—2016《承压设备无损检测 第 14 部分:X 射线计算机辅助图像检测》和 ISO 17636-2:2013 *Non-destructive testing of welds-Radiographic testing — Part 2: X- and γ -ray techniques with digital detectors* 中易于混淆的术语和定义进行理论

对比分析和试验,以帮助从业人员更好地理解标准,推动 CR 检测技术在特种设备行业中的更好应用。

1 标准对分辨力和分辨率的定义

术语和定义取自 NB/T 47013.11 和 NB/T 47013.14 现行标准中。

1.1 分辨力

两个相邻细节间最小距离的分辨能力,用 mm 表示。

1.2 分辨率

分辨率定义为单位长度上可分辨两个相邻细节间最小距离的能力,用 lp/mm 表示。分辨率分为系统分辨率和图像分辨率,用双线型像质计或分辨率测试卡测试。

数字图像的分辨率(力),限定了图像所能分辨的、处于与射线束垂直平面内的相邻细节(缺陷)间的最小尺寸,即图像可以分辨的细节最小间距。

分辨率和分辨力的主要区别在于分辨率是相对值,分辨力是绝对值,分辨率等于 2 倍分辨力的倒数。

收稿日期:2019-02-21

作者简介:陈小明(1984—),男,工程师,主要从事锅炉、压力容器无损检测应用工作

通信作者:陈小明,shanxichenxm@163.com

1.2.1 系统基本空间分辨率(简称系统分辨率)

在无被检工件的情况下,按照标准测试条件获得的,单位长度上 CR 系统数字图像所能显示的最小细节的能力,用 S_{R_b} 表示。

1.2.2 图像空间分辨率(简称图像分辨率)

在有被检工件的情况下,按照实际检测条件得到的,单位长度上数字图像所能显示的最小细节的能力,用 $S_{R_b^i}$ 表示。

系统分辨率与检测系统有关,与被检对象无关,反应检测系统本身特性,主要取决于使用的射线机、CR 扫描仪和 IP 板类型。射线机焦点尺寸小,激光扫描仪扫描步进小,IP 晶体体积小可获得较高的图像分辨率。例如晶体体积小的 IP 分辨率比较高,可达 $25 \mu\text{m}$ 甚至更小。晶体体积较大的,空间分辨率也较低,最多只能达到 $50 \mu\text{m}$ ^[1]。

图像分辨率是检测系统针对特定检测对象在特定检测条件时,得到的检测图像分辨率,主要考核图像的不清晰度。对于特定的检测系统,系统分辨率一定值,图像分辨率随检测对象和透照工艺的变化而不同,且数值低于系统分辨率。

1.3 扫描分辨率

由扫描决定的数字图像的像素几何尺寸,取决于激光扫描仪扫描 IP 板的行间距,以及激光点扫描行走速度与转换器工作频率之比。

扫描分辨率(扫描精度或扫描步进)主要受激光斑点尺寸,步进电机的运动精度和激光头摆动精度的影响。扫描分辨率是控制 CR 系统图像质量和 IP 扫描速度的关键因素,扫描分辨率高,相应的扫描速度就慢,获得的图像分辨率就高。实际系统分辨率低于理想状态的系统分辨率^[2]。

2 标准中分辨力和分辨率的指标规定

2.1 图像分辨率的表述

在实际应用中,各个射线数字成像检测标准并未严格区分双线型像质计读数值、图像不清晰度,其分辨率和分辨力的关系如表 1~3 所示。

在 NB/T 47013.11—2015 标准中图像分辨率单位用 $\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 表示,在 NB/T 47013.14—2016 和 ISO 17636-2:2013 中用分辨力表示分辨率,单位为 mm。

在实际应用中并未严格区分分辨力和分辨率间的关系,常用分辨力表示分辨率。例如:某图像分辨率为 $5 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$,对应分辨力为 0.1 mm ,图像不清晰度为 0.2 mm ,双线型像质计测定值为 D10,则该图像分辨率为 D10 或 0.1 mm 。

表 1 NB/T 47013.11—2015 标准的表 5 中
B 级像质应达到的图像分辨率

公称厚度 T 或透照 厚度 W 范围/mm	图像分辨率/ ($\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$)	丝号	丝径/ mm
$>2 \sim 4$	10.00	D13	0.05
$>4 \sim 8$	7.70	D12	0.063
$>8 \sim 12$	6.25	D11	0.08
$>12 \sim 40$	5.00	D10	0.10
$>40 \sim 120$	3.85	D9	0.13
$>120 \sim 200$	3.125	D8	0.16
>200	2.50	D7	0.20

表 2 NB/T 47013.14—2016 标准的表 9 中
B 级像质应达到的图像分辨率

公称厚度 T 或透照 厚度 W 范围/mm	应识别线号 (丝径/mm)	应达到的最低空 间分辨率/mm
≤ 1.5	D13+(0.08)	0.04
$>1.5 \sim 4$	D13(0.10)	0.05
$>4 \sim 8$	D12(0.125)	0.063
$>8 \sim 12$	D11(0.16)	0.08
$>12 \sim 40$	D10(0.20)	0.10
$>40 \sim 100$	D9(0.26)	0.13

表 3 ISO 17636-2:2013 标准的表 B.14 中
B 级像质应达到的图像分辨率

透照厚度 W/mm	像质计灵敏度最小值 和最大不清晰度/mm	最大空间分辨率(等同 于丝径和间距)/mm
$W \leq 1.5$	D13+0.08	0.04
$1.5 < W \leq 4$	D13(0.10)	0.05
$4 < W \leq 8$	D12(0.125)	0.063
$8 < W \leq 12$	D11(0.16)	0.08
$12 < W \leq 40$	D10(0.20)	0.10
$40 < W \leq 120$	D9(0.26)	0.13
$120 < W \leq 200$	D8(0.32)	0.16
$W > 200$	D7(0.40)	0.20

2.2 归一化信噪比计算时的分辨率选择

在归一化信噪比计算时,同样采用分辨力的值代入公式进行计算,但不同的标准对分辨率的规定又不相同。

ISO 17636-2:2013 标准中归一化信噪比 S_{NR_N} 的定义为:利用从数字图像中直接测量的基本空间分辨率 S_{R_b} 和 S_{NR} 值(即 $S_{NR_{measured}}$)经式(1)归一化得到。

$$S_{NR_N} = S_{NR_{measured}} \times \frac{88.6}{S_{R_b}} \quad (1)$$

式中: 88.6 为归一化系数, 单位为 μm 。

在进行归一化信噪比计算时, S_{R_b} 为系统分辨率或图像分辨率对应的分辨力值, 即双线型像质计丝径或丝径距离的值。

NB/T 47013.14—2016 标准定义归一化信噪比 S_{NR_N} 为基于 CR 系统分辨率 S_{R_b} , 经归一化处理后的信噪比, 可用式(2)表示。

$$S_{NR_N} = S_{NR_m} \times \frac{C}{S_{R_b}} \quad (2)$$

式中: C 为归一化系数, 等于 $88.6 \mu\text{m}$; S_{NR_m} 为测量信噪比。

同时该标准条款 C.3 规定“进行归一化信噪比测量所需的 CR 系统分辨率的值按照附录 B 测定。”从术语定义和归一化信噪比计算公式可看出, S_{R_b} 为 CR 系统分辨率。

通过分析, 不同标准对归一化信噪比计算公式是相同的, 但分辨率取值不同, ISO 17636-2: 2013 规定为图像分辨率, NB/T 47013.14—2016 为系统分辨率。对同一图像而言, NB/T 47013.14—2016 测量的图像归一化信噪比数值高于 ISO 17636-2: 2013 的, 即按照 NB/T 47013.14—2016 标准采集的图像质量可能不满足 ISO 17636-2: 2013 标准的要求。

例如某 CR 检测系统的分辨率为 D11(0.08 mm), 采用此 CR 系统按照 AB 级对 60 mm 平板对接焊缝进行检测, 当管电压为 350~450 kV 时, 图像归一化信噪比要求 ≥ 98 。如果图像测量信噪比为 100, 图像分辨率为 D6(0.25 mm)。分别将系统分辨率和图像分辨率代入式(2)进行计算得到: 系统分辨率为 0.08 mm 时, $S_{NR_N} = 110.8 > 98$ 满足标准要求; 图像分辨率为 0.25 mm 时, $S_{NR_N} = 35.4 < 98$ 不满足标准要求。

可见对同一图像, 在测量信噪比相同的情况下, 采用不同的分辨率代入公式计算得到的归一化信噪比数值相差超过 3 倍。

在实际 CR 检测应用中, 为获得高质量的 CR 检测图像, 图像归一化信噪比计算时并未采用系统分辨率, 而是采用图像分辨率。

3 分辨率试验

采用型号 HPX-1Plus 的激光扫描仪, HR 型成像板, HSXY-320HP 型射线机(焦点尺寸为 1.0 mm), 厚度为 6 mm 的低碳钢钢板进行试验。

3.1 扫描分辨率和系统分辨率

按照 NB/T 47013.14—2017 附录 B 要求, 将两个

双线型像质计同时放在 IP 板上分别与像素行或列成 $2^\circ \sim 5^\circ$ 的倾角, 扫描参数和透照条件如表 4 所示。

表 4 CR 系统测试扫描参数和透照条件

扫描参数		曝光参数	
扫描分辨率/ μm	25	焦距/mm	1 000 \pm 50
激光功率	高	管电压/kV	160
PMT(光电倍增管)增益	20	曝光量/(mA·min)	14
透照条件: 1 mm Cu 前置滤光板; 数字图像的平均灰度应大于最大灰度的 50%			

按照上述条件进行曝光和 IP 板扫描后, 得到系统分辨率如图 1 所示。

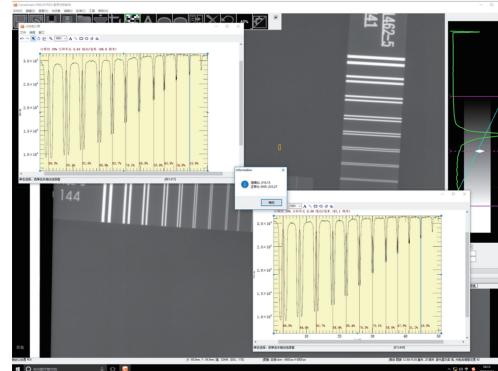


图 1 CR 检测系统分辨率测试

对图像进行分析, 可得出以下结论: ① 按照采样定理, CR 扫描仪的扫描分辨率 P 为 $25 \mu\text{m}$, 理想状态系统分辨率 $R = 2P = 50 \mu\text{m}$; ② 当激光束与双线型像质计丝径垂直时系统分辨率为 $88.8 \mu\text{m}$, 激光束与双线型像质计丝径平行时系统分辨率为 $82.1 \mu\text{m}$, 两个方向略有差异, 系统分辨率为 D11, 即 $S_{R_b} = 80 \mu\text{m}$; ③ 系统实测分辨率低于理想分辨率, 系统分辨率不仅与扫描分辨率相关, 还与 IP 板类型有关。

3.2 扫描分辨率和图像分辨率

采用相同的透照工艺(管电压 150 kV, 曝光量 5 mA·min, 焦距 700 mm)对 6 mm 厚的钢板进行透照。透照时, 只改变扫描分辨率, 而激光功率和 PMT 增益值保持不变, 测试数据如表 5 所示。

由表 5 可得出以下结论: ① 在特定的 CR 检测

表 5 扫描分辨率对图像分辨率的影响

参数	扫描分辨率/ μm			
	25	35	50	100
图像分辨率 $S_{R_b}^i/\mu\text{m}$	91.3(D11)	91.5(D11)	92.2(D11)	110.4(D10)

系统中, 激光扫描仪扫描分辨率越高, 图像分辨率越高; ② 在满足产品检测要求下, 扫描分辨率变化对图像分辨率不会产生明显影响, 适当降低扫描分辨率可提高扫描速度; ③ 激光扫描仪的分辨率应可以调节以适应各种检测需要, 图像采集时扫描分辨率要高于标准要求的图像分辨率。

3.3 系统分辨率和图像分辨率

射线数字图像检测技术中, 图像不清晰度包括几何不清晰度 U_g 和图像固有不清晰度 U_c , 可用图像分辨率表示, 其等于 2 倍图像分辨率(力)^[1]。

$$U = 2S_{R_b}^i \quad (3)$$

$$U^3 = U_g^3 + U_c^3 \quad (4)$$

固有不清晰度 U_c 可用式(5)表示。

$$U_c = 2S_{R_b} \quad (5)$$

表 6 焦距对图像分辨率的影响

焦距/mm	几何不清晰度		系统分辨率 S_{R_b} (固有 不清晰度 U_c /mm)	图像分辨率实测值 $S_{R_b}^i$ (图像不清晰度 U_m /mm)	图像不清晰度 计算值 U /mm
	U_g /mm	U_c /mm			
200	0.030 9		D11, 88.8 μm (0.1776)	D11, 93.6 μm (0.1872)	0.177 9
300	0.020 4		D11, 88.8 μm (0.1776)	D11, 93.1 μm (0.1862)	0.177 7
400	0.015 2		D11, 88.8 μm (0.1776)	D11, 92.8 μm (0.1856)	0.177 6
500	0.012 1		D11, 88.8 μm (0.1776)	D11, 92.3 μm (0.1846)	0.177 6
600	0.010 1		D11, 88.8 μm (0.1776)	D11, 92.4 μm (0.1848)	0.177 6
700	0.008 6		D11, 88.8 μm (0.1776)	D11, 92.2 μm (0.1844)	0.177 6
800	0.007 6		D11, 88.8 μm (0.1776)	D11, 92.3 μm (0.1846)	0.177 6
1 000	0.006 0		D11, 88.8 μm (0.1776)	D11, 91.6 μm (0.1832)	0.177 6

表 6 进行分析, 可得以下结论: ① 图像不清晰度计算值小于图像不清晰度测定值, 即实际图像分辨率低于理论计算结果; ② 焦距从 200 mm 变化到 1 000 mm 时, 图像分辨率未发生明显变化, 图像分辨率增大, 几何不清晰度降低, 图像分辨率逐渐提高; ③ 虽然图像分辨率未发生明显变化(未超过一个丝号), 但对应的分辨率数值下降的百分比不同

几何不清晰度 U_g 可用式(6)表示。

$$U_g = d_f \times L_2 / (F - L_2) = d_f \times L_2 / L_1 \quad (6)$$

式中: F 为焦点至 IP 板的距离; d_f 为焦点尺寸; L_1 为焦点至工件表面的距离; L_2 为工件表面至 IP 板的距离。

由式(6)可知: 几何不清晰度与焦点尺寸和工件厚度成正比, 与焦点至工件表面的距离成反比。在焦点尺寸和工件厚度一定的情况下, 焦距越大, U_g 值越小, 图像分辨率越好。

通过 3.1 中的试验测得该 CR 检测系统分辨率 S_{R_b} 为 88.8 μm , 固有不清晰度 U_c 为 0.177 6 mm。扫描参数和透照电压保持不变, 曝光量按平方反比定律计算, 通过改变焦距, 测得的图像分辨率变化如表 6 所示。

(图像分辨率 80~100 μm 都属于 D11); 图 2(a)中图像分辨率实测值为 88.8 μm , 第一对不能识别的双线型像质计丝径百分比为 15.8%, 图 2(b)中图像分辨率实测值为 92.2 μm , 第一对不能识别的双线型像质计丝径百分比为 12.7%; ④ 因 CR 检测的图像分辨率和系统分辨率高, 图像分辨率主要取决于系统分辨率, 当焦距满足标准相关等级最小焦距情

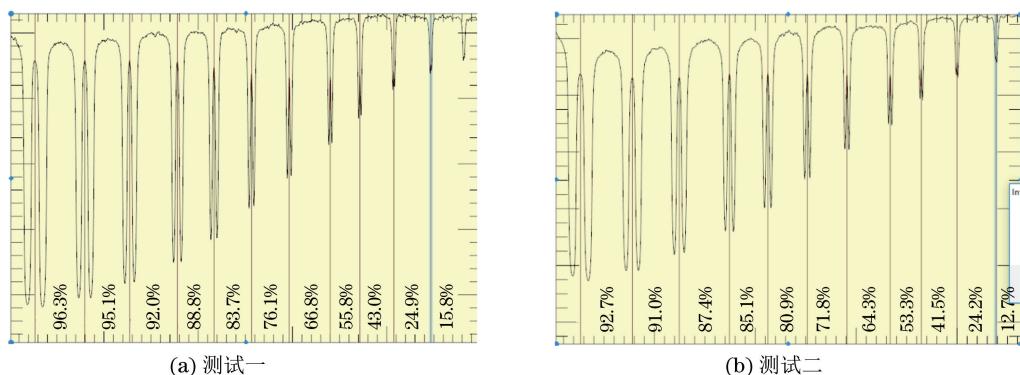


图 2 CR 图像分辨率测试

(下转第 31 页)

对图 6 中的双丝像质计进行测量可知,采用 X 射线检测时空间分辨率为 D10,采用 γ 射线检测时空间分辨率为 D8;结合表 7 中的相应数据进行综合判定,对于 $\phi 45 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$ 的小径管采用 X 射线检测时灵敏度和空间分辨率皆可以达到 B 级要求,信噪比达到 AB 级要求,采用 γ 射线检测时灵敏度和信噪比可以达到 AB 级要求,但空间分辨率不满足 AB 级要求。

通过图像及检测数据比对发现,采用 X 射线装置检测的 DR 成像效果明显好于 γ 射线的,对于有较高图像质量需求的工件应采用 X 射线装置,对于一般图像质量需求的工件可以采用 γ 射线装置,但应进行工艺验证与优化,保证检测灵敏度、空间分辨率和信噪比满足标准要求。

3 结语

通过对 CR 与 DR 数字射线检测技术的等价性

~~~~~

(上接第 20 页)

况下,焦距和射线机焦点尺寸产生的几何不清晰度  $U_g$  对图像不清晰度  $U$  的影响很小,即对图像分辨率的影响较小。

### 4 结语

分辨率(或分辨力)是射线数字成像图像质量评价的重要参数之一,决定了缺陷细节的分辨能力。分辨率是相对值,分辨力是绝对值,对于特定的系统,可用分辨力表示系统的检测能力,但在对不同系

评价和试验分析可知,以上两种技术在选择合适的工艺参数时,其检测图像质量可以达到甚至优于 B 级胶片射线检测质量,其检测能力可以满足船舶射线领域主要应用试件厚度范围的检测需求,已经具备了现场实际应用的技术基础,但由于数字射线检测技术的普及率相对较低,对于复杂作业环境下的适用性还有待考证。

#### 参考文献:

- [1] 郑世才.数字射线检测图像质量[J].无损探伤,2016,40(1):14-17.
- [2] 郑世才.数字射线检测图像质量对比度的标准规定说明[J].无损探伤,2019,43(1):31-33,36.
- [3] 郑世才.数字射线检测等价技术级别评定[J].无损探伤,2016,40(6):1-4,9.
- [4] 巩德兴,姚力,陈晓辉,等.X 射线数字成像在压力管道检测中的应用[J].无损检测,2017,39(11):27-30.

统或被检工件之间进行对比时,分辨率则较为客观。通过对射线数字成像各标准术语中分辨率和分辨力的理论计算对比,分析了各标准中分辨率和分辨力的差异,并通过试验验证了扫描分辨率对系统分辨率和图像分辨率的影响,为 CR 检测工艺的制定提供了依据,以推动 CR 检测技术的更好应用。

#### 参考文献:

- [1] 林树青,寿比南. NB/T 47013《承压设备无损检测》标准释义[M].北京:新华出版社,2018.