

提高工业数字射线图像对比度及信噪比的工艺措施

尹 芹, 谭云华, 马桂振

(东方锅炉股份有限公司, 自贡 643001)

摘要: 对比度及信噪比是构成工业射线数字图像质量的核心要素。从人眼的视觉特性入手, 计算验证了人眼对灰度的分辨能力, 在数字射线探测器接收特性基础上总结了图像对比度及信噪比与曝光参数的关系, 据此提出了一种提高工业数字图像对比度及信噪比的工艺措施。可供优化数字式射线实时成像检测工艺(RTR)及配置检测设备时参考和应用。

关键词: 射线实时成像; 对比度; 信噪比; 灰度; 灰度直方图

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2011)01-0058-04

Technical Measures of Improving Contrast and SNR of Industrial Digital Image

YIN Qin, TAN Yun-Hua, MA Gui-Zhen

(Dongfang Boiler Company Ltd, Zigong 643001, China)

Abstract: Contrast and SNR are core factors of industrial image quality. Starting with human vision character, the distinguishing ability of eyes for grey grades was calculated and tested. The relationships of contrast and SNR to exposure parameters were deduced based on receiving character of digital radiation detector. A technical measure to improve contrast and SNR of industrial digital image was hereby presented. Present method could be applied for optimizing digital RTR technique and referenced for configuring RTR equipment.

Keywords: Real time radiography; Contrast; SNR; Gray; Gradation histogram

近年来, 随着以 DR, CR 为代表的数字化射线检测技术的发展, 工业数字图像这种信息载体取代传统卤银式胶片的趋势越来越明显。在数字图像的应用中, 信息的最终接受者是人, 图像通过人的眼睛成像在视网膜上, 刺激视神经细胞引起视觉, 在此基础上人的大脑产生了对图像的主观认识。笔者从人眼的视觉特性入手, 利用韦伯-费希纳定律计算人眼对显示器显示灰度的分辨能力并予以验证, 同时, 围绕灰度这一客观指标, 对提高工业数字图像对比度的工艺措施予以研讨分析。

1 人眼对灰度的分辨能力

与底片采用黑度表征对比度类似, 数字图像采

用灰度这一物理量表征对比度。灰度也就是图像的亮度层次, 一幅数字图像由许多亮度不同的像素组成, 如果从图像中最亮部分到最暗部分之间的亮度等级越多, 则说明这幅图像层次越丰富, 图像质量也就越好。

亮度视觉变化符合韦伯-费希纳定律, 它表明对于不同亮度 L 人眼能觉察的最小亮度变化量 ΔL_{\min} 不同, 但在相当大的亮度范围内, 可觉察的最小相对亮度变化 $\Delta L_{\min}/L$ 却等于一个常数 ζ , 此值称为对比度灵敏度阈或韦伯-费赫涅尔系数(Weber-Fechner Ratio)^[1]。人眼能辨别的对比度灵敏度阈 ζ 与亮度 L 的关系^[2]如图 1 所示。可见, 在亮度 $<1 \text{ cd/m}^2$ 范围内 ζ 值会急剧增高, 而在亮度 $>1 \text{ cd/m}^2$ 范围 ζ 为一常数值。

基于以上知识, 现计算人眼在显示器上观察图像时所能分辨的灰度等级差。设图像最小亮度为 $L_{\min} = L_1$, 则人眼能分辨的第二级亮度为:

收稿日期: 2010-03-04

作者简介: 尹 芹(1973—), 男, 高级工程师, 长期从事锅炉、压力容器和核承压设备无损检测工作。

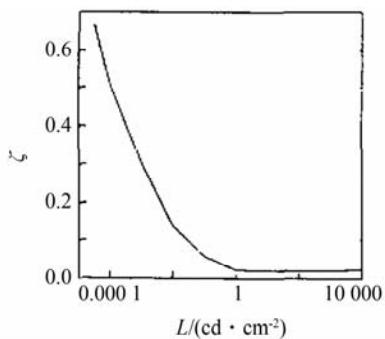


图1 人眼对亮度的分辨能力

$$L_2 = (1 + \zeta)L_1$$

同理,第三级亮度为:

$$L_3 = (1 + \zeta)L_2 = (1 + \zeta)^2 L_1$$

以此类推,所能分辨出的第n级亮度为:

$$L_n = (1 + \zeta)^{n-1} L_1 = L_{\max}$$

设 $C=L_{\max}/L_{\min}$,对等式两边取自然对数,经整理后可得眼睛能分辨的亮度层次为:

$$n = 1 + \frac{\ln C}{\ln(1 + \zeta)}$$

$\zeta \rightarrow 0$ 时,有 $\ln(1 + \zeta) \rightarrow \zeta \rightarrow 0$,则:

$$n \approx \frac{1}{\zeta} \ln C = \frac{2.3}{\zeta} \lg C \quad (1)$$

显示器的最大亮度值 L_{\max} 一般 $\geq 150 \text{ cd/m}^2$,而最小亮度值 $< 1 \text{ cd/m}^2$,由于在 1 cd/m^2 以下 ζ 不再是一个常数,而是一个逐渐增大的变量,简化处理取 $L_{\min} = 1 \text{ cd/m}^2$,则:

$$n \approx \frac{2.3}{\zeta} \lg 150 = \frac{5}{\zeta}$$

对比度灵敏度阈 ζ 是一个主观量,与测试条件有关,测试环境、被测试人的个体差异,以及测试图像的具体情况都会影响 ζ 值,有资料表明^[1]:在人眼适宜的亮度下, $\zeta = 0.005 \sim 0.02$ (相当于黑度差 $0.002 \sim 0.008$)。在实际工作中时,受测试环境如杂散光的影响, ζ 的值有可能更大些,但保守的估计 ζ 总是不会超过 0.05 (相当于黑度差 0.02)。

取 $\zeta = 0.05$,则 $n = 100$;取 $\zeta = 0.02$,则 $n = 250$;取 $\zeta = 0.005$,则 $n = 1000$ 。

以下在方正 17" 液晶显示器上对上述结果做一验证。由于 Photoshop 等许多软件的灰度滑块只能输入整数百分比($0\% \sim 100\%$),即从灰度滑块中只能选择出 101 种灰度,因此选择在手动设置 256 级灰度的图形制作软件 Adobe Illustrator CS3 下绘制灰阶测试图并进行实际测试(图 2)。测试结果如图 3 所示。



图2 灰阶测试图

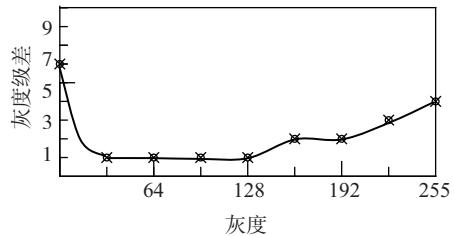


图3 人眼对灰度的分辨能力

可以看出,人眼对普通显示器灰度识别的最佳区间为 32~128 之间。灰度值为 0 时,人眼刚可分辨的灰度级差为 6 级,这是因为当亮度很低时, ζ 值较大,人眼对亮度差的区分能力很弱,而当灰度值在 160 以上时,灰度分辨能力有降低的趋势。总体来说,对于测试所使用的普通显示器来说,人眼的灰阶识别总数在 128 级以上,符合理论预期。

分析认为,若采用专业灰阶显示器,人眼可识别灰阶数将会明显增加。这是由于:① 灰阶显示器能够显示 1 024 甚至 4 096 级灰阶。② 灰阶显示器经特殊校正后,能够做到相邻两灰阶的相对亮度差比值恒定,以适合人的视觉心理,这一点尤为重要。③ 灰阶显示器亮度高达 700 cd/m^2 ,亮度每增大一倍,可识别的阶梯的数量就能增加 14 级(取 $\zeta = 0.05$)。至于灰阶显示器不能显示色彩,这在 RTR 应用中也实在算不上一个缺点,因为虽然人眼对色彩的分辨能力达到上千万种,但灰度是强度量,人的大脑能本能地将其与射线强度联系起来,而对于色彩而言,这种心理过程并不会发生,所谓“伪彩”增强技术并不能提高缺陷识别度。

2 曝光参数与灰度的关系

2.1 灰度直方图

为便于说明问题,先简要介绍灰度直方图^[3]的概念。所谓灰度直方图是灰度级的函数,它表示图象中具有某种灰度级的像素的个数,它给出了一个

简单可见的指示,用来判断一幅图像的层次。同样内容的一幅图像占据的灰度范围窄,说明层次少,对比度小;反之,则说明层次丰富,对比度高。某线阵列 RTR 检测系统所用成像软件的灰度直方图如图 4 所示。

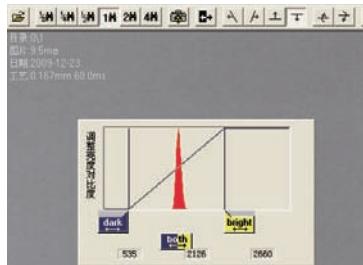


图 4 灰度直方图

图中横坐标表示采集灰度 G ,纵坐标表示图像中对应采集灰度级所出现的像素个数。采集灰度 G 的数值由射线探测器接收的光子数目线性量化而得,取值范围为 0~4 095。需要说明的是,显示器显示灰度并不等同于这里提到的采集灰度,前者是由后者二次线性量化得到,其具体数值可以通过移动调节亮(暗)电平改变。对于普通显示器,显示灰度的取值范围为 0~255。

采集灰度是形成图像对比度的基础和根本,通过软件二次量化调节显示灰度确也能增强图像对比度,但却并不能改善图像信噪比,适度地使用这种对比度增强功能确能利于缺陷的识别,但一旦过度就会出现“量化值不足”的情况,即图像对比度虽然高,但是颗粒感强,噪声大,缺陷识别度不增反降。

2.2 数字射线探测器接收特性

以 YXLON325 恒电位 X 光机作为射线源,测试线阵列接收器 SEZ160 的接收特性。试验方案是在等厚试件上固定管电压 U (管电流 I),逐次增加管电流 I (管电压 U),记录各次试验时的图像采集灰度 G 。测试数据如图 5 所示。

可以看出,采集灰度 G 与管电流 I 成线性关系,与管电压 U 成指数关系。

2.3 对比度与曝光参数的关系

接下来试验对比度与曝光参数的关系。在线阵列接收器上放置 10,11 mm 的钢阶梯试块,记录不同曝光条件下图像中两阶梯采集灰度 G 的差值 ΔG ,如图 6 所示。测试和计算结果如图 7 所示。

可见,对比度 ΔG 也与管电流成线性关系,与管电压成指数关系。根据图 5 和 7 试验结果,计算得出对比度 ΔG 与采集灰度 G 的关系如图 8 所示。

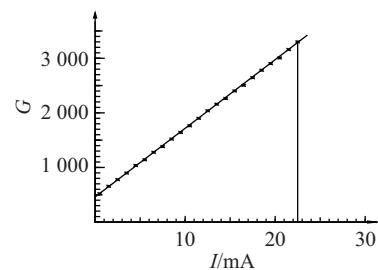
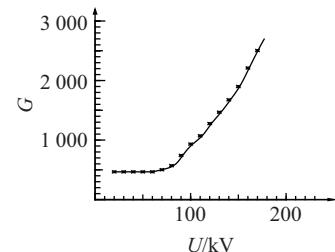
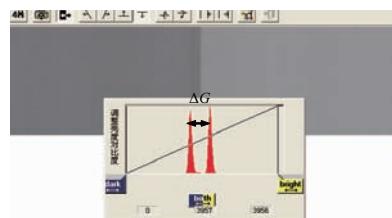
(a) $I-G(U=130 \text{ kV})$ (b) $U-G(I=10 \text{ mA})$ 图 5 采集灰度 G 与管电流 I 及管电压 U 的关系

图 6 对比度-曝光量试验

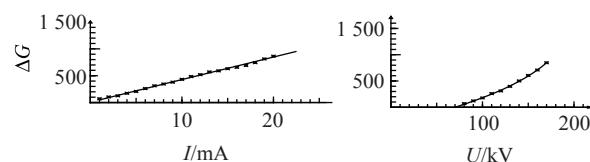
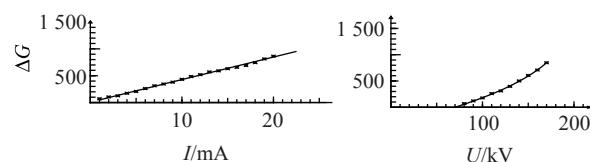
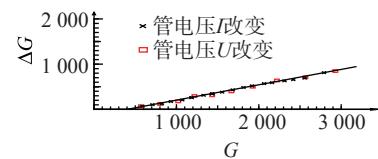
(a) $I-\Delta G$ (b) $U-\Delta G$ 图 7 对比度与管电流 I 及管电压 U 的关系

图 8 对比度与采集灰度的关系

可见,对比度 ΔG 与采集灰度 G 成线性关系。在试验条件下,无论是改变管电压 U 还是管电流 I ,只要采集灰度 G 相同,对比度 ΔG 就基本一致。

进一步的接收特性试验表明,数字 RTR 工艺参数中积分时间的作用与管电流 I 等效。

从图像质量的角度出发,除对比度 ΔG 以外,噪声 σ 也是业界所关心的,图像质量的改善必须建立在信噪比($\Delta G/\sigma$)提高的基础上。

按射线噪声理论^[4],成像器接收的光子 N 时刻存在涨落现象,具体呈现为泊松分布规律,即当光子数平均值为 N 值时,标准差(平均偏差)就为 \sqrt{N} 。 $\Delta G \propto N$, $\sigma \propto \sqrt{N}$,因而信噪比: $\Delta G/\sigma \propto \sqrt{N}$,该式表明图像的信噪比随曝光量的增加而提高。

3 RTR 适宜的工艺参数

根据以上试验分析结果可以看出,曝光参数(更确切地说为曝光量)是决定图像对比度及信噪比的内在因素。为获取更好的信噪比,应采用较大的曝光量。在实际工作中,根据灰度直方图就可以判断选用的曝光参数是否合适。根据实践经验,笔者认为,当灰度直方图位于 50%~70% 满刻度时,曝光参数选用比较适宜,检测效果最佳,可以以此作为优化检测工艺的一个客观指标。

为取得最佳参数,管电流、管电压和降噪时间三个调节量可根据需要在允许范围内任意调节,实际工作中,只需要检查实施工艺的灰度直方图(图 9)。

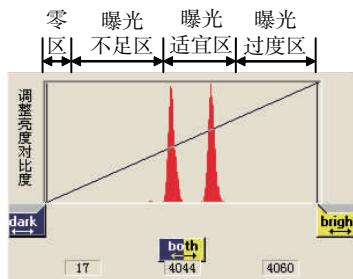


图 9 直方图曝光量分区

(1) 如发现直方图低于满刻度的 50%,表明该工艺条件偏低,应适当调整工艺参数,增加曝光量,使直方图右移至曝光适宜区。

(2) 如发现直方图高于满刻度 70%,应适当调整工艺参数,降低曝光量,使直方图左移至曝光适宜区。这是因为过大的曝光量虽有利于提高对比度和信噪比,但会造成图像过亮且无法通过移动亮(暗)电平调暗,根据图 3 的测试结果,这时人眼对普通显示器灰阶的识别能力较差。

还需注意,亮度调节应使暗电平(dark)与直方图的间距等于或稍小于直方图与亮电平(bright)的间距,这样二次量化后的图像显示灰度就落在人眼对灰度识别能力的最佳区间。

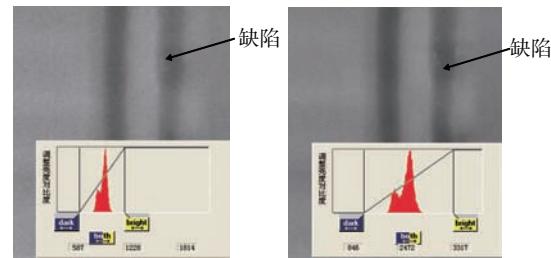


图 10 某焊口图像(规格 $\phi 51\text{ mm} \times 7\text{ mm}, 225\text{ kV}$)

采用不同曝光量的某焊口图像如图 10 所示。

可以看出,管电流从 7.5 mA 增加到 15 mA 后,图像对比度增大,信噪比和缺陷识别度提高,图像质量显著改善(注:显示器上观察图像质量差异更明显)。

4 结论

(1) 普通显示器显示的灰度等级在 32~128 之间时,人眼对其具有较好的识别能力。在应用工业射线数字成像系统评定数字图像时,应把控制显示器的灰度控制在此范围内,过暗或过亮都会影响数字图像的细节观察。

(2) 适当增大曝光量可增加缺陷与背景采集灰度差,从而提高信噪比和缺陷识别度。以 RTR 检测系统为例,当使曝光量灰度直方图位于 50%~70% 满刻度时焊口图像质量最佳,过高或过低都将影响缺陷检测。

(3) 在一般 RTR 工业应用中,曝光参数管电压、管电流和积分时间三者对提高图像对比度和信噪比的作用基本等效。可视具体情况综合调节,只要达到第(2)条的效果,便可获得满意的图像质量;如果不能调节到第(2)条的效果,说明系统检测能力的配置与检测工件规格不匹配,应完善配置方案。

(4) RTR 检测采用专业灰阶显示器可获得更佳的图像质量。

参考文献:

- [1] 俞斯乐,郭福云,李桂芬,等.电视原理[M].北京:国防工业出版社,1988.
- [2] 郝允祥,陈暇举,张保洲.光度学[M].北京:北京师范大学出版社,1997.
- [3] 左飞,万晋森,刘航. Visual C++ 数字图像处理开发入门与编程实践[M].北京:电子工业出版社,2008.
- [4] 强天鹏.射线检测[M].云南:云南科技出版社,2001.