

孙朝明, 曾祥照, 王增勇. 数字化射线扫描成像中的图像评价与控制初探[J]. CT理论与应用研究, 2010, 19(2): 61-68.  
Sun CM, Zeng XZ, Wang ZY, et al. Discussion on evaluation and control of image quality for X-ray linear array detector[J]. CT Theory and Applications, 2010, 19(2): 61-68.

# 数字化射线扫描成像中的图像评价与控制初探

孙朝明<sup>1</sup>, 曾祥照<sup>2</sup>, 王增勇<sup>1</sup>

1. 中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900  
2. 广东盈泉钢制品公司, 广东 清远 511538

**摘要:** 数字射线技术正获得越来越广泛的应用, 并成为射线检测技术的发展趋势。但目前有关数字射线技术的标准对于图像质量控制方面的规定还相对简单, 难于进行有效的质量控制, 因而在实际检测中可能出现较大的随意性而影响检测结果评判。使用互补金属氧化物半导体(CMOS)线阵列射线探测器与阶梯试块进行射线检测实验, 得到了不同厚度所对应的灰度图像, 测试了影像对比度, 同时分析了图像的信噪比和检测灵敏度。通过对实验结果的综合对比分析, 提出了数字化射线检测图像质量控制措施。

**关键词:** 数字化射线技术; CMOS 线阵列射线探测器; 图像质量

**文章编号:** 1004-4140(2010)02-0061-08    **中图分类号:** O 536; TP 391    **文献标识码:** A

数字射线技术正获得越来越广泛的应用, 并成为射线检测技术的发展趋势。如欧洲目前正进行一个联合研究项目“Film Free”, 以充分推动数字射线技术在生产中的应用<sup>[1]</sup>。目前可较好应用于生产的数字射线技术包括直接数字化射线成像(Digital Radiography, DR)和计算机射线成像(Computed Radiography, CR)。CMOS 线性阵列是一种新的 DR 探测器, 该装置的感光元件采用单一纵向阵列, 每个元件有其自己独立的读出放大器; 且对内置的电子元件进行良好屏蔽, 通过光纤束将光信号转化为数字信号。

数字射线技术检测快捷、效率高, 不足的是可能使检测结果存在大的差异, 但如何将差异控制在合理的范围内又难于进行科学的规定。目前国内有关数字射线技术的标准对于图像质量控制方面的规定还比较简单: 规定采用像质计(Image Quality Indicator, IQI)来测定图像质量<sup>[2-3]</sup>, 图像有效评定区的灰度一般应控制在 80~220 之间<sup>[3]</sup>。

本文针对数字化射线检测中的图像质量<sup>[4-5]</sup>进行分析和评价, 以找到相关的影响因素, 并进行合理控制。

## 1 数字化射线检测图像质量评价

### 1.1 数字化射线检测实验

使用 CMOS 探测器进行射线检测实验。其主要性能参数为: 成像单元尺寸为 83 μm, 数字化转换单元为 12 bit(4 096 灰度), 可承受电压为 320 kV。CMOS 探测器使用前应进行校准, 此时就规定了进行检测的参数, 如成像精度、曝光时间等。校准分 3 个步骤: ①不开

收稿日期: 2010-01-25。

基金项目: 中国工程物理研究院国防预研项目(K606-09-Y)。

启射线, 进行探测器偏置测量; ②开启射线, 调节射线电压到规定值, 进行探测器饱和测量(探测器达到最大响应但未出现饱和); ③降低射线检测电流, 使探测响应降低为第二步响应的一半, 进行探测器规则化测量。根据检测工件厚度的不同, 使用时进行相应的探测器校准。

考虑到检测对象存在多样性, 且保证检测结果不失一般性, 因此采用一定厚度的阶梯试块(图 1)进行检测实验。检测时采用常规焦点射线源(尺寸为 3.6 mm), 源到检测物表面的距离为 835 mm, 到 CMOS 探测器距离为 870 mm。实验方案如图 2 所示, 主要区别在于探测器校准状态不同, 即在校准过程的第二步时, 射线窗口前放一定厚度(0 mm, 3 mm, 6 mm, 8 mm, 12 mm)的钢板进行能量衰减。图 2 中自上到下每条路线代表一个数字化射线检测图像对应的检测条件, 如检测不加像质计, 探测器校准时用 3 mm 钢板, 检测电压为 150 kV。

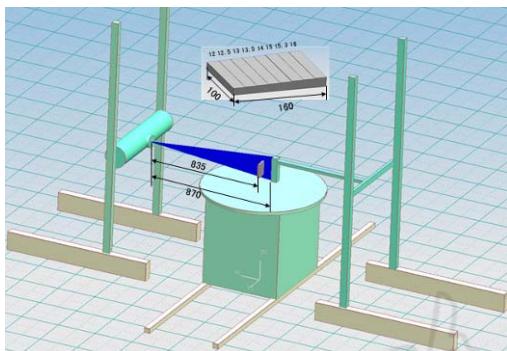


图 1 检测透照布置  
Fig. 1 The testing layout

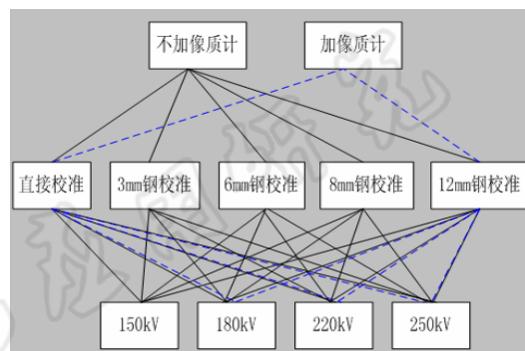


图 2 实验方案路线  
Fig. 2 The testing scheme

## 1.2 数字化射线检测图像质量评价

### 1.2.1 图像对比度

由于射线穿透物质厚度不同, 因此采用胶片照相时底片图像显现出不同的黑度值; 对应的数字化射线检测时由于透射厚度不同而数字图像中显现不同的灰度值。数字化图像可进行后期处理, 如通过灰度拉伸而使图像的对比度增强, 在进行图像对比度评价时只针对原始图像进行。

典型的数字化射线检测图像如图 3 所示, 图像中 8 个台阶可清晰辨别。沿图中直线进行垂直灰度投影, 结果如图 4 所示。从图中可看到每一特定厚度的台阶透照后产生某一个灰度值, 充分表明了射线检测的原理, 体现了厚度差异反映出的对比度差异; 而沿直线所在位置读取出的灰度值则表现出很强的噪声, 图像细节的对比性降低。如果将检测图像(图 3)按图中矩形区域进行水平横向投影, 则得到图 5 所示结果。可以看出, 每一个台阶由于厚度不同而产生不同的灰度值, 保持响应的近似性, 并在某具体位置指示出灰度响应的不确定性和随机性。

在不同透照电压下, 不同厚度台阶所对应的灰度响应如图 6 所示。由于透照电压的差异, 每一台阶对应的灰度响应表现高低不同, 检测图像的有效灰度范围( $\Delta G = G_{\max} - G_{\min}$ )

存在差别。可以看出，由于有效灰度范围的不足，在150 kV透照电压下，15 mm与15.3 mm两个台阶的灰度差别难以区分。

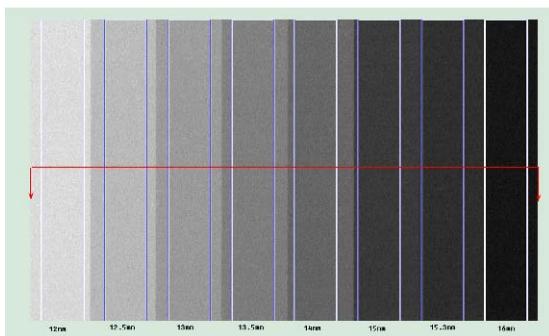


图3 阶梯试块的数字化射线检测图像

Fig.3 DR image of step wedge specimen

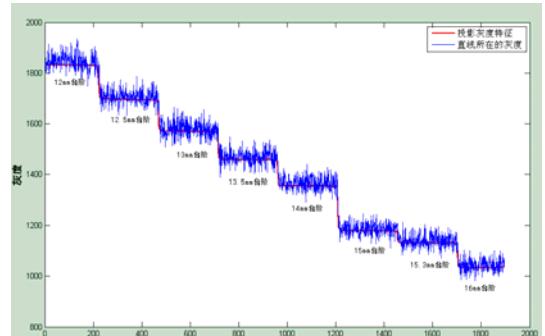


图4 阶梯试块的灰度响应曲线

Fig.4 The response curve of specimen

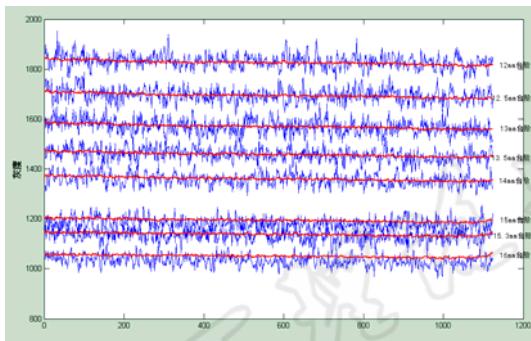


图5 阶梯试块的灰度响应曲线

Fig.5 The response curve of specimen

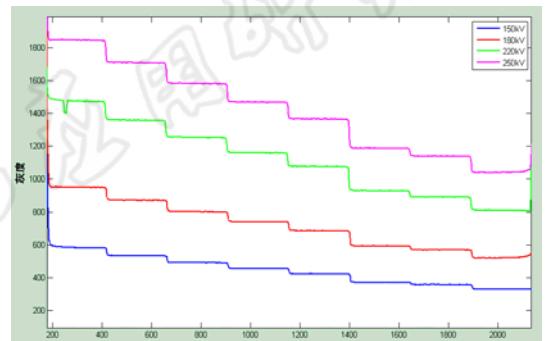


图6 不同透照电压下对应的灰度响应

Fig.6 Different gray-level response of specimen

从图6中呈现的结果进行计算，可得到不同厚度钢对应不同灰度的响应曲线，如图7所示，与胶片法获取  $D$ (黑度)- $\delta$ (厚度/mm)- $U$ (射线电压/kV)关系曲线类似<sup>[6]</sup>。为有效突出检测对象的细节差异，应使图7中曲线的斜率尽可能大。

如果考虑探测器校准状态的差异，计算相同透照电压下的厚度灰度对应关系曲线，所得到的结果并没有明显差异。

### 1.2.2 图像信噪比

如前所述，不同厚度台阶所对应的灰度响应整体上存在较好的层次性（图6和图7），但某一点的响应却是随机的（图4和图5）。这些随机性表现为图像中的噪声，它产生于射线散射、探测器电子噪声等。

图像信噪比是数字图像的一个重要指标。如果图像中噪声太大，将会掩盖一些细节信息，如较小的厚度差异而导致的灰度差就不可辨别。

在其他检测条件保持相同的情况下, 进行了不同重复采样次数 ( $N=1$ ,  $N=4$ ) 的对比实验。由于采样次数的增加而增加了曝光时间, 增大了检测的曝光量, 因而图像噪声水平明显降低, 响应曲线的随机性明显减弱 (图 8)。

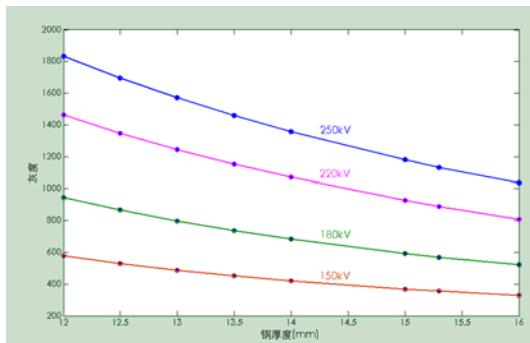


图 7 厚度灰度对应关系曲线

Fig. 7 Relation curve of thickness and gray value

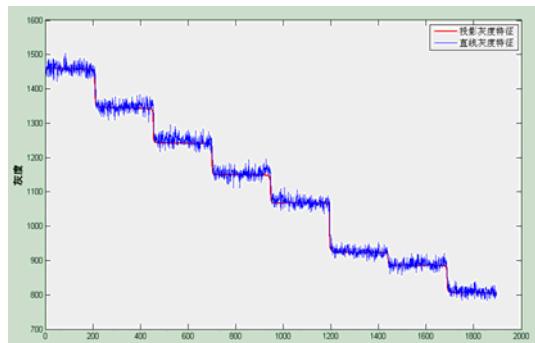
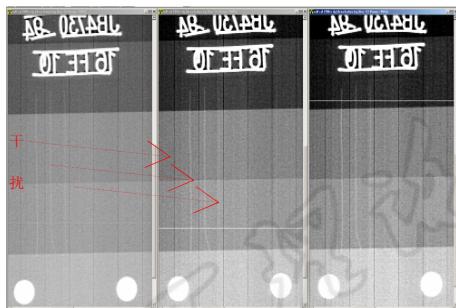
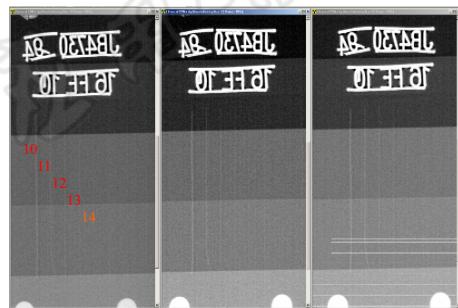


图 8 阶梯试块的灰度响应曲线 (平均降噪)

Fig. 8 The response curve of specimen



(a) 直接校准



(b) 12 mm 钢校准

图 9 检测灵敏度测试

Fig. 9 Results of IQI sensitivity test

### 1.2.3 检测灵敏度

射线穿透厚度的差异, 导致形成了一定对比度的射线图像, 便于物体内部超标不连续性 (尤其是体积型) 缺陷检出。但射线散射 (尤其是高电压时) 引入随机噪声使图像信噪比降低, 射线源焦点存在一定尺寸使图像混叠、不清晰。射线探测器响应状态不同, 因此在数字化射线检测中会表现出不同的检测灵敏度。双丝型像质计<sup>[7-8]</sup>可有效检测射线成像中的几何不清晰度, 表明射线成像的空间分辨能力, 但国内目前尚未广泛采用。

采用通常的做法测量射线检测的灵敏度, 即采集图像时将像质计放在平板试块上射线源侧。

检测分为两组情况进行对比 (图 1), 一组采用直接校准, 另一组采用 12 mm 钢板校准。透照电压分别为 180 kV, 220 kV, 250 kV。

由于直接校准方法引入了很多噪声, 如图 9 (a) 中规则的暗条纹线, 导致可识别的像

质计丝仅为第3根12#；虽然因透照电压不同，数字图像的灰度响应范围不同（图6），但3幅图像中像质计灵敏度的差异很小。

12 mm钢板校准后采集的图像可轻松识别出第4根像质计丝，第5根像质计14#隐约可见。3种透照电压下的图像中像质计差异依然很小。

对比图9(a)和图9(b)，在其他检测参数相同的情况下，由于探测器校准状态的不同而导致检测灵敏度存在一个到两个像质计丝的差别。将某厚度台阶上的像质计丝图像进行水平横向投影，结果如图10所示。

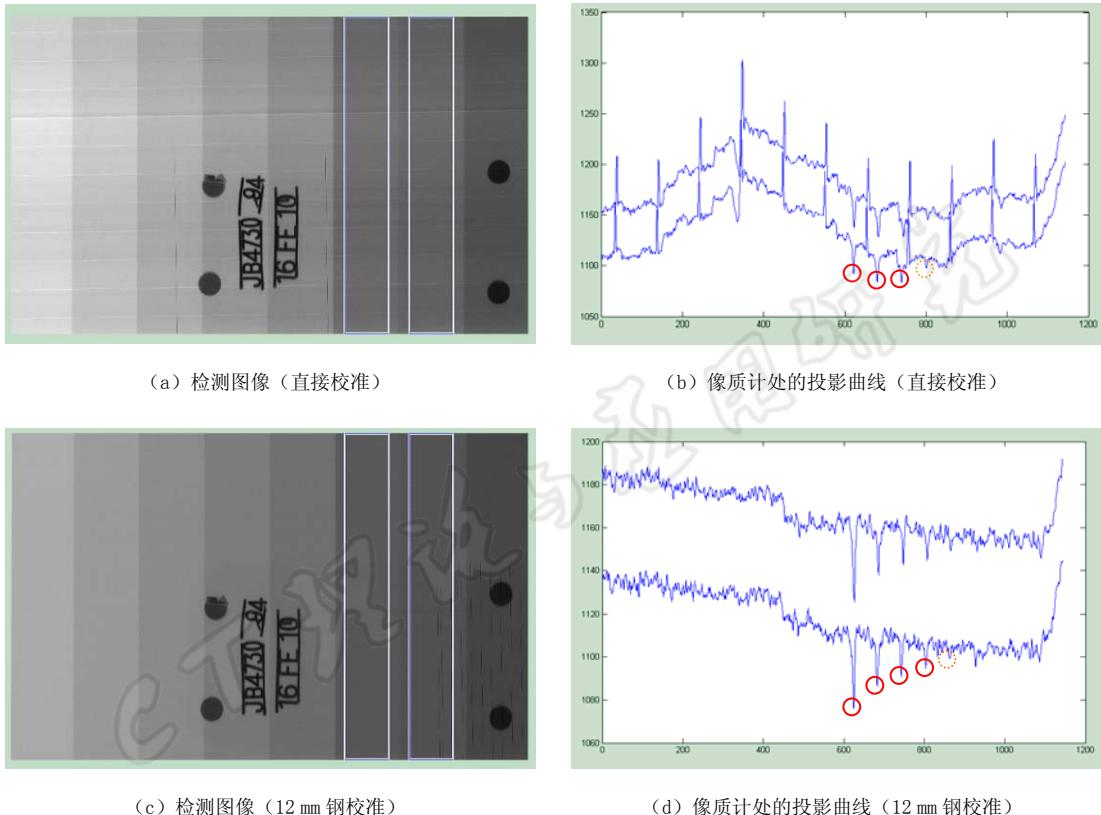


图10 像质计检测灵敏度对比  
Fig. 10 Comparison of IQI sensitivity

#### 1.2.4 响应一致性

如图10所示，由于探测器校准导致输出信号存在大的波动性，因而影响了图像的对比度以及细节的可检出性。

检测时直接进行校准，阶梯试块检测图像中出现干扰条纹。但如果衡量各个台阶对应的灰度响应，则灰度差异很小——厚度差导致的图像对比度是作为整体统计的特征，因而图像中8个台阶都可识别。

进行水平横向投影，会发现明显的差别：由于校准的差异，导致探测器横向输出明显不一致，主要表现为图5所示曲线呈现波浪变化。而这种不一致对于图像的质量影响具有

非常坏的影响，应该设法加以避免，如对探测器输出进行分析建模，采用校正方法消除成像时的不一致<sup>[9-11]</sup>。

## 2 数字化射线检测图像质量控制

### 2.1 采用像质计进行灵敏度控制

射线检测结果图像可观察到的最小细节尺寸，可发现和识别细节图像差异的能力，决定了射线检测的质量和效果。像质计具有特定的结构和细节形式，可用于测定射线检测灵敏度。一般而言，像质计灵敏度越高，则检测图像质量水平就越高，发现缺陷的能力也越强。

采用像质计进行灵敏度控制在胶片照相时适用，在数字化射线检测时仍然是切实可行的，同时也使数字射线检测与传统射线照相具有可比性。

### 2.2 合理控制探测器校准

数字化射线检测时每个探测单元响应特性将很大程度上决定检测图像的质量。

探测器校准效果不好主要表现为响应不一致、检测灵敏度降低、在图像中增加干扰条纹，因此，在检测时应格外加以控制。

从结果来看，探测器校准状态对于图像的对比度参数影响很小，但对检测灵敏度影响较大。其原因在于对比度参数侧重于较大范围内整体评价，而灵敏度参数侧重于局部范围评价。

### 2.3 选取合适的曝光量

从阶梯试块的灰度响应曲线可看出，每一台阶的灰度值存在一定范围内的随机起伏，噪声干扰降低了检测结果的信噪比，影响到细节图像（尤其是裂纹类等低对比度细节）的识别。

在射线透照时，曝光量的增加将会提高检测图像的信噪比，这一点与胶片照相法相同，但数字化射线检测时探测器的曝光时间比胶片照相时胶片的曝光时间要短许多。如果要提高曝光量，就只能增加检测时间、降低检测速度。

### 2.4 设置合适的灰度响应范围

设置合适的灰度响应范围是检测图像可识别的前提条件，如果灰度响应很低，即使再如何进行后期的图像处理，也不会改善图像质量。因此检测时需选取合适的透照电压，使灰度响应曲线的斜率尽可能大，从而增加图像对比度，增加细节的可辨别性（图 7）。

## 3 结论

射线检测依据透视影像进行缺陷判别，透视影像质量的优劣决定了射线检测效果的好坏。因此，对透视影像进行质量评价与控制至关重要。传统射线照相方法在长期应用中，积累了大量经验，形成了较完善的方法，为数字化射线检测方法提供了参考。

参照传统射线照相方法，提出对数字化射线检测图像进行质量评价与有效控制的方法。两种方法的区别只不过是成像介质从胶片转换为数字射线探测器，而在射线检测工艺方法上并没有特别大的区别。

综上，数字化射线检测与传统胶片照相在检测图像质量控制方面具有一定的相似性，但也有所区别，如表1所示。

表1 数字化射线检测与胶片照相法的质量控制比较  
Table 1 Quality control parameters comparison of DR and radiography

	传统胶片照相法	数字化射线检测法
灵敏度控制	采用像质计	采用像质计
成像介质校准	受底片颗粒影响，可忽略	对图像质量有重要影响
曝光量控制	增加曝光量提高底片质量	增加采样次数，延长单位曝光时间
成像介质响应	控制底片黑度及合适范围	需设定合适灰度量化及显示范围

由于CMOS线阵列探测器在检测时需要进行相对运动以完成检测图像的采集，因此运动状态也将影响到数字图像的质量。检测时的相对运动速度不匹配，将会导致图像出现拉伸或者压缩变形；检测时工作台出现上下跳动，将降低检测图像的清晰度，与运动方向平行的线状缺陷或像质计丝图像将会变得模糊。

在对检测图像进行质量评价与有效控制的基础上，应用数字化射线检测方法不会产生较大的随意性，其检测结果将更加科学合理，充分发挥快速、高效检测的优势。

## 参考文献

- [1] Uwe E, Uwe Z, Klaus B. Strategies for film replacement in radiography-films and digital detectors in comparison[C]. CD-Proceedings of 17th World Conference on Nondestructive Testing. NDT.net, 2008: 277.
- [2] GB/T 19293-2003, 对接焊缝X射线实时成像检测法[S].  
GB/T 19293-2003, Method of X-ray radioscopy for butt-weld[S].
- [3] GJB 5364-2005, 射线实时成像检测方法[S].  
GJB 5364-2005, Real-time radiographic testing[S].
- [4] Kong FQ. Quality evaluation for the digital radiography inspection based on imaging parameters[C]. CD-Proceedings of 17th World Conference on Nondestructive Testing. NDT.net, 2008: 72.
- [5] Zeng XZ. Ray detection digital image quality and influential factors[C]. CD-Proceedings of 17th World Conference on Nondestructive Testing. NDT.net, 2008: 272.
- [6] 中国机械工程学会无损检测分会. 射线检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.  
Chinese Mechanical Engineering Society NDT Branch. Radiographic testing[M], Beijing: Machinery Industry Press, 1997.
- [7] ASTM E1000-98, Standard Guide for Radioscopy[S].
- [8] ASTM E2597-07, Standard Practice for Manufacturing Characterization of Digital Detector Arrays[S].
- [9] 梁丽红, 路宏年, 孔凡琴. 射线检测数字实时成像的不一致性研究[J], 光学技术, 2003, 29(4): 439-444.  
Liang LH, Lu HN, Kong FQ. Non-uniform research of X-ray real-time digital radiography[J]. Optical technique, 2003, 29(4): 439-444.
- [10] 李俊江, 路宏年, 李保磊. 射线图像增强器像元响应不一致性的分析及校正[J]. 光学技术, 2006,

- 32(5): 779-784.
- Li JJ, Lu HN, Li BL. Analysis and correction of XRII-CCD pixel response nonuniformity[J]. Optical Technique, 2006, 32(5): 779-784.
- [11] 胡栋材, 陈浩, 张定华. 基于平板探测器的锥束 CT 散射校正方法[J]. CT 理论与应用研究, 2009, 18(1): 16-22.
- Hu DC, Chen H, Zhang DH. Scatter correction method for flat-panel detector-based cone beam CT[J]. CT Theory and Applications, 2009, 18(1): 16-22.

## Discussion on Evaluation and Control of Image Quality for X-ray Linear Array Detector

SUN Chao-ming<sup>1</sup>, ZENG Xiang-zhao<sup>2</sup>, WANG Zeng-yong<sup>1</sup>

1. Institute of Machinery Manufacturing Technology, CAEP, Mianyang 621900, China  
2. Guangdong Yingquan Steel Products Co. Ltd, Qingyuan 511538, China

**Abstract:** Digital radiography (DR) is used more and more in practice, and it is becoming the development trend of radiographic testing. But the standards about digital radiography are brief on the control of image quality, so the digital images are easily to be degenerated by random factors, thus the accuracy of results is likely to be affected. Digital radiography system with Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Transistor (CMOS) linear array detector was used to test a specimen, which has 8 different steps. Then the image quality was evaluated, the contrast, SNR (Signal Noise Ratio) and Image Quality Indicator (IQI) sensitivity of different images were comprehensively analyzed. Finally, how to properly control the image quality was discussed.

**Key words:** digital radiography (DR); CMOS linear array detector; image quality

**作者简介:** 孙朝明 (1977—), 男, 2002 年毕业于上海大学, 获工学硕士学位, 中国工程物理研究院机械制造工艺研究所工程师, 主要从事无损检测技术研究, 获军队科学技术进步三等奖 2 项, 发表论文 10 余篇, E-mail: chm\_sun@163.com。