

Mechanism Research and Optimization of X-Ray Nondestructive Testing System

Weiye Jin*, Runze Xu*, Heng Yang*, Xulei Qin#, Jiabao Li, Te Lan

Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin
Email: *yoohever@163.com

Received: Jul. 9th, 2019; accepted: Jul. 22nd 2019; published: Jul. 29th, 2019

Abstract

X-ray inspection occupies the main position in the field of non-destructive testing and is widely used in various fields. In this paper, the composition of *in situ* X-ray detection system and the realization of hardware function are analyzed. Experimental analysis was carried out on various components of X-ray image intensifier, MCP collimator, FPGA image processing system, etc., and the factors affecting the imaging quality of the whole testing system were studied in detail, so as to improve and optimize the whole NDT system.

Keywords

Nondestructive Testing, mcp Collimator, FPGA, Picture Processing

X射线无损检测系统的机理研究和优化

金唯一*, 徐润泽*, 杨 恒*, 秦旭磊#, 李佳宝, 兰 特

长春理工大学, 吉林 长春
Email: *yoohever@163.com

收稿日期: 2019年7月9日; 录用日期: 2019年7月22日; 发布日期: 2019年7月29日

摘 要

X射线检测在当前无损检测技术方面占据着主要地位, 广泛应用于各个领域。本文重点分析了X射线检测系统的组成和硬件功能的实现。对X射线像增强器、mcp准直器、FPGA的影像处理系统等各组成部分进行实验分析, 详细研究了影响整个检测系统成像质量的因素, 对整个无损检测系统进行改进和优化。

*共同第一作者。

#通讯作者。

关键词

无损检测, mcp准直器, FPGA, 图像处理

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

伴随 X 射线实时检测技术的发展与在社会中的各种应用, 以前总会在医学中发挥重要的作用, 但是目前在其他很多方面都有很广泛的应用, 例如食品、航天、高价的电子元器件等许多方面, 本文重点分析 X 射线无损检测系统的构成及达成过程。并进行实验分析。

原位 X 射线检测系统靠 X 射线生发模块、影像强化模块、X 射线搜集模块、影像处理模块及凸显屏等组合而成。图 1 是原位 X 射线检测系统的示意图。借助于 X 射线图像增强器增强射线能量的强度, 并通过屏幕将 X 射线转换成可见光图像。最终借助 CCD 摄相机搜集影像, 通过影像处理器加以处理显示且储存于电脑上。

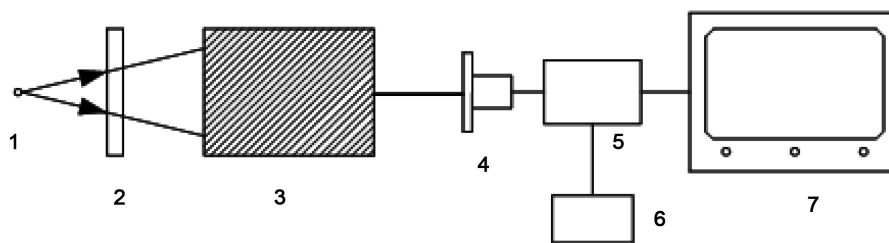


Figure 1. Rendering of the in situ X-ray inspection system. (1. X-ray tube 2. Test object 3. Image intensifier 4. CCD camera 5. Computer 6. Image processor 7. Highlighter)

图 1. 原位 X 射线检测系统呈现图。(1. X 射线管 2. 被测验物 3. 影像强化器 4. CCD 摄相机 5. 电脑 6. 影像处理器 7. 凸显器)

2. X 射线像增强器

X 射线像增强器是 X 射线检测系统的一个关键技术, 其用途为强化射线实际强度, 把不可见射线转换成可见光影像。如图 2 显示。X 射线阴极可以把较弱的低能射线能量借助光电效果变化为电子影像, X 射线影像 - 电子图像 - 增强图像 - 增强的可见光图像。

借助散射线同一次射线强度的具体比值来描绘成射线成像对比度, 具体式子是:

$$\Delta D = -\frac{0.434\mu G\Delta T}{1+n}$$

这里面 n 属于散射比, 可见散射比越大, 那么 X 射线影像的对比度就越小, 影像越是不清晰。

3. 基于 MCP 的准直器

如图 3 所示微通道板中各个通道的内壁上, 都有镍铬的金属薄膜, 外输出高电势的能量。

准直器工作原理具体如图 4 所示, 准直器的铅制侧壁可以吸收散射角度复杂的散射线, 将散射线减小到像平面比率并提高图像质量。

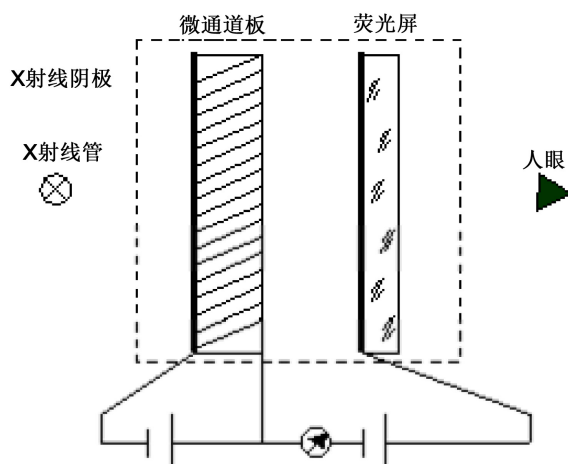


Figure 2. Schematic diagram of the X-ray image intensifier based on MCP

图 2. 基于 MCP 的 X 射线图像增强器示意图

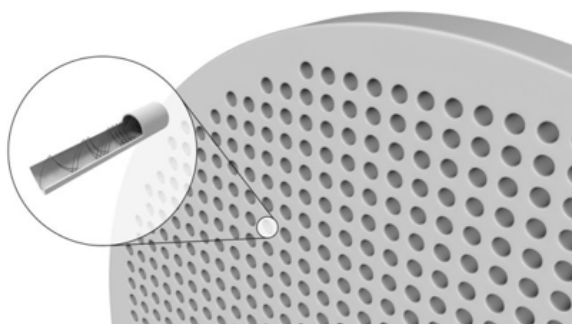


Figure 3. Microchannel board

图 3. 微通道板

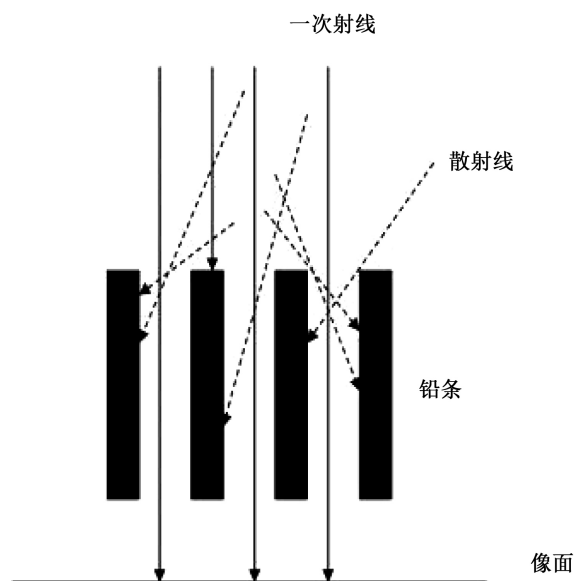


Figure 4. Working principle of the collimator

图 4. 准直器工作原理

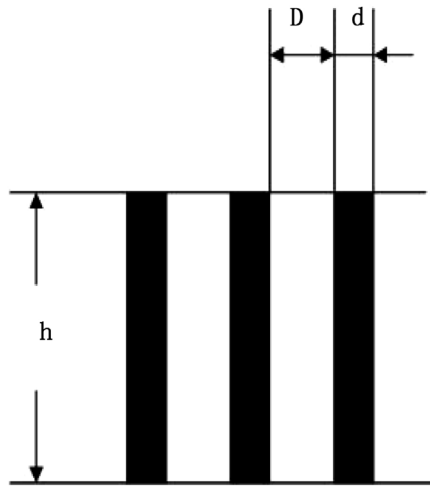


Figure 5. Schematic diagram of the collimator structure

图 5. 准直器结构呈现图

如图 5 所示栅比 R 是衡量其吸收散射线能力的重要参数。

$$R = \frac{h}{D}$$

R 越大，它吸取 X 射线散射线的水平越高，准直性越好。

栅密度 n 能体现出准直器对 X 射线散射线的吸收效益。

$$n = \frac{1}{d+D}$$

对于准直器的物理参数，它包括 X 射线透射率 T_p ，全 X 射线透射率 T_t ，挑选能、散射线穿透率 T_s 、对比度改观系数 K 等。

一次 X 射线透过率

$$T_p = \frac{I_p''}{I_p'}$$

散射线透过率

$$T_s = \frac{I_s''}{I_s'}$$

全 X 射线透过率

$$T_t = \frac{I_t''}{I_t'} = \frac{I_p'' + I_s''}{I_p' + I_s'}$$

$$\Sigma = \frac{T_p}{T_s}$$

对比度改善系数

$$K = \frac{T_p}{T_t}$$

由上面式子可以看见， Σ 的值越大，那么准直实效越是好。比对度改良系数同影像品质关联，伴随 K 值增加，影像越是清楚。

通过调控电压大小，能够控制他的增益效果。在 50 K_v 管电压测试下，采用的准直器栅比 R 和栅密度 n 关系如下：

$$D = 50 \mu\text{m}, d = 10 \mu\text{m}, L = 0.5 \text{ mm}$$

$$\text{栅比 } R = \frac{L}{D} = 10$$

$$\text{栅密度 } n = \frac{1000}{1.72(D+d)} = 9.7 \text{ lp/mm}$$

为了确定 MCP 准直器在多种情况下的性能参数，在 X 射线检测系统中所采用 X 射线能量范围内取三个管电压进行测试，分为 40 kV、50 kV、70 kV，其中管电流为 1 mA。测试装置如图 6。

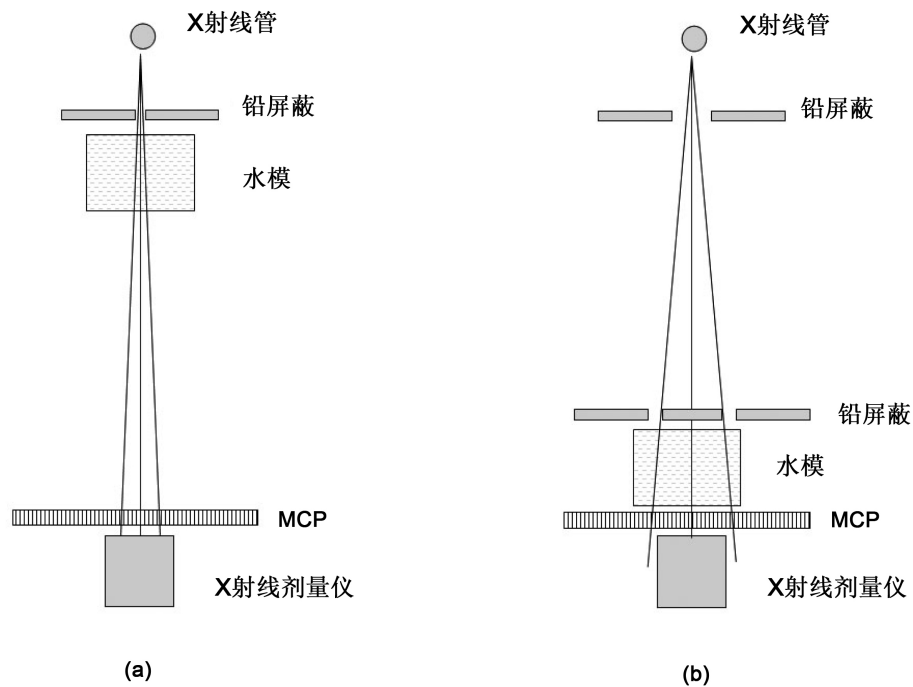


Figure 6. Collimator detection facility rendering
图 6. 准直器检测设施呈现图

图 6(a)展示的设施为检测 MCP 的一次射线透射率，图 6(b)所示装置，用来测量散射线透过率 T_s 。准直器的功能参数借助运算射线强度获得某次 X 射线穿透率 T_p 、散射线穿透率 T_s 、全 X 射线穿透率 T_t ， I_p'' 属于借助 MCP 时候的 X 射线的实际强度， I_p' 属于没有借助 MCP 时候射线的具体强度。参数表见表 1，

Table 1. MCP collimator parameter table under different voltages
表 1. 不同电压下 MCP 准直器参数表

	T_p	T_s	T_t
40 kV	0.32	0.06	0.09
50 kV	0.37	0.08	0.12
70 kV	0.42	0.1	0.13

$$T_p = \frac{I_p''}{I_p'} = \frac{0.07}{0.19} (\text{mR})$$

$$T_s = \frac{I_s''}{I_s'} = \frac{0.01}{0.12} (\text{mR})$$

$$T_t = \frac{I_t''}{I_t'} = \frac{0.09}{0.72} (\text{mR})$$

图 7 显示了 X 射线强度和选择能量的变化。

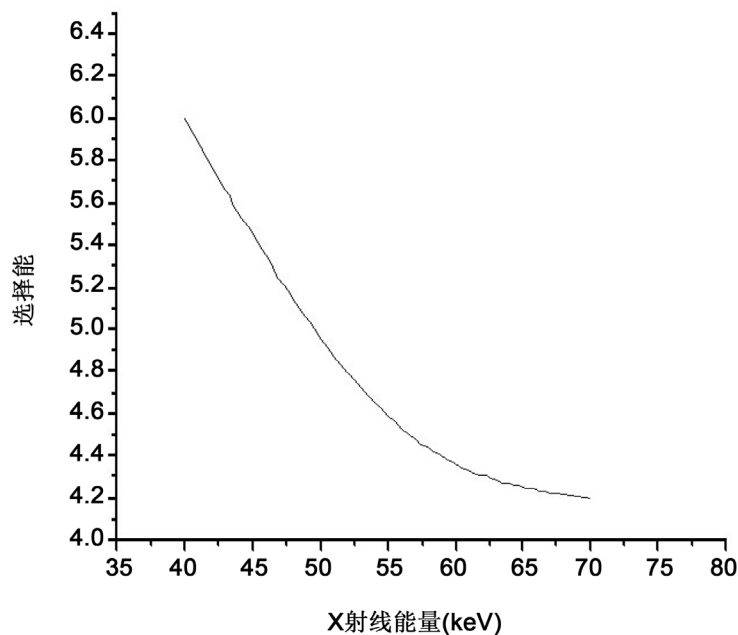


Figure 7. MCP collimator picking energy and X-ray energy relationship curve

图 7. MCP 准直器挑选能量同 X 射线能量联系曲线

$$S = \phi/L_i^2$$

4. CCD 摄像机

CCD 影像传感器是基于惯常见到的光电变换元件，体积小、重量很轻、功能平稳。实物图见图 8 所示，工作原理图如图 9 所示。



Figure 8. CCD sensor

图 8. CCD 传感器实物

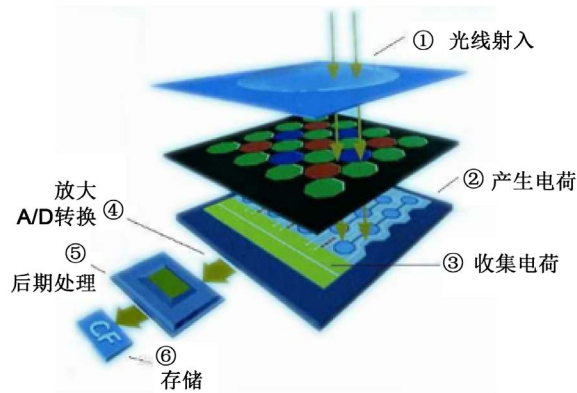


Figure 9. CCD working principle diagram
图 9. CCD 工作原理图

CCD 最关键的参数是分辨率，CCD 的分辨率衡量于 CCD 芯片的实际像素个数，原位 X 射线像增强器的分辨率是 ω (lp/mm)，所以物质同像面的平面空间频率联系是

$$\omega_{\text{像}} = \frac{\omega_{\text{物}}}{M}$$

M 为放大的倍数，依靠采样所规定的空间频率关系，CCD 的固有空间频率应该高于所采图像的空间平率的 2 倍左右，即

$$\omega_{\text{CCD}} \geq 2\omega_{\text{像}}$$

5. 图像处理系统

5.1. 图像处理系统结构

本论文选用的是 ZhiXin (至芯) Red Cyclone ZX-2 FPGA 开发板，该开发板具有配置接口丰富，存储容量大，输出电压种类多，扩展接口丰富等特点。

如图 10 为射线影像处理体系构造图。图 11 为图像处理结构，在源头端 SDRAM 里放进初始影像信息，在影像处理模块输入参数且开启硬件模块。首先将指定参数输入到图像处理单元中，在来源端 SDRAM 输入计算求得的位址以进行数据读写，然后在一个时钟周期内，利用算法在图像处理单元计算求得的新数据，在目标 SDRAM 中将处理结果进行缓存，用于处理下一帧图像。

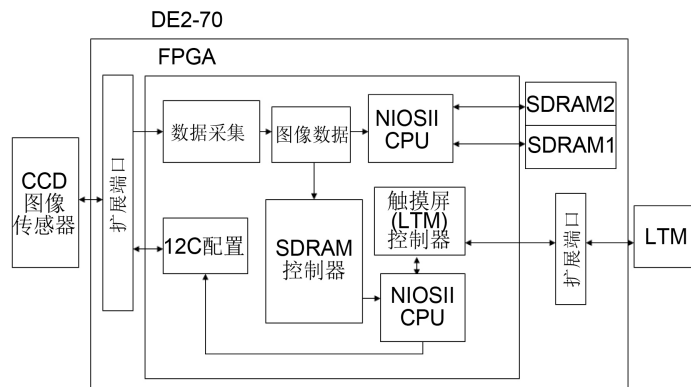


Figure 10. Structure of the radiographic processing system
图 10. 射线影像处理体系构造图

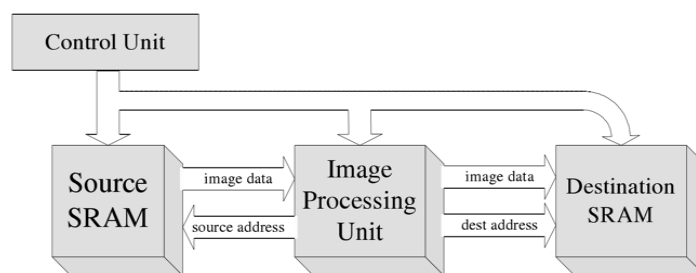


Figure 11. Image processing structure
图 11. 图像处理结构

5.2. 图像处理检测结果

根据 X 射线成像理论, 借助于原位 X 射线成像系统收集待检测物质的 X 射线图像。最初, 大家直接开启检测系统, 先不对物质加以检测, 获得 X 射线原图, 如图 12 所示, 此时系统电压为 50 kv, 电流为 200 μA 。



Figure 12. X-ray original image without the measured object
图 12. 无被测物体发 X 射线原图

我们可以发现, 在没有通过任一影像处理的现状下, 因为出现较乱散射线以及热噪声等元素[1], 搜集的 X 射线影像噪声散布随机而且范畴普遍, 假如对被检测物加以检测, 此类噪声对检测结论会带来非常大的扰乱及偏差。我们利用基于小波的图像去噪方法、中值滤波法进行图像增强及多帧叠加平均法降噪这三种图像处理算法复合的方法, 渐次对 X 射线原图加以影像处理计算, 大家就获得清楚去噪的影像, 具体见图 13 显示。

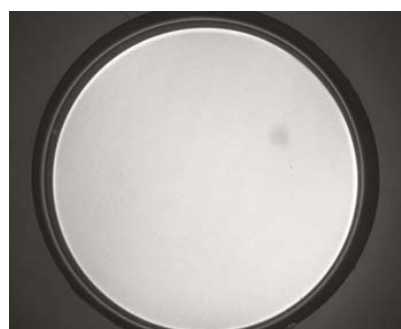


Figure 13. X-ray denoising diagram of the object without measurement
图 13. 无被测物体的 X 射线去噪图

在对实物加以原位 X 射线检测里，设计外输电流 $200\ \mu\text{A}$ ，电压是 $50\ \text{kV}$ ，X 射线用于照射检测到的芯片，由 X 射线图像增强器成像，并由 CCD 相机捕获以获得 X 射线图像。X 射线原图以及实物图具体见图 14 及图 15 显示。



Figure 14. Physical map of the tested chip
图 14. 被测芯片实物图

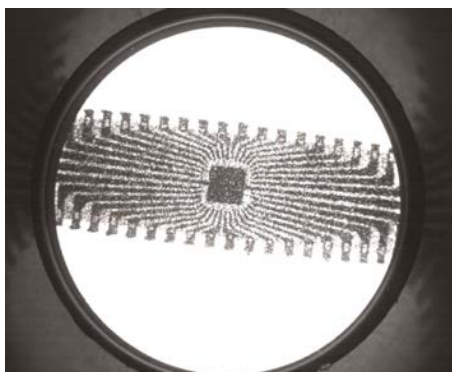


Figure 15. X-ray original image of the tested chip
图 15. 被测芯片 X 射线原图

借助对比图 15 以及图 16 能够发现，芯片实物图通过眼睛是难以看到内部金属构造的，而借助原位 X 射线检测系统，就可以发现芯片的内部构造，图 15 虽说可以看清楚芯片内部构造，但是噪声斑点较多，对芯片的 X 射线原图加以影像处理计算，去噪后获取图像，如图 16 所示。

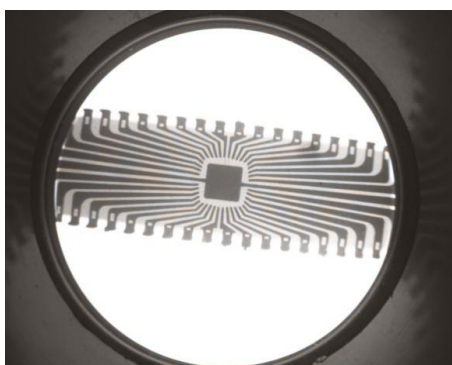


Figure 16. Chip X-ray denoising
图 16. 芯片 X 射线去噪图

比对图 17 及图 18，大家能够很清楚地看到，通过处理以后的影像，高频噪音被显著限制，大家能够清楚地发现芯片之内的金属构造了，图 17 是芯片的内部情况图，借助检测结果显示，大家可以借助原位 X 射线测验体系对塑料外壳所包的芯片展开内部构造测验，检测其整体性，假如芯片的内部构造存在断点抑或坏点，我们通过 X 射线图像便会寻找出来。

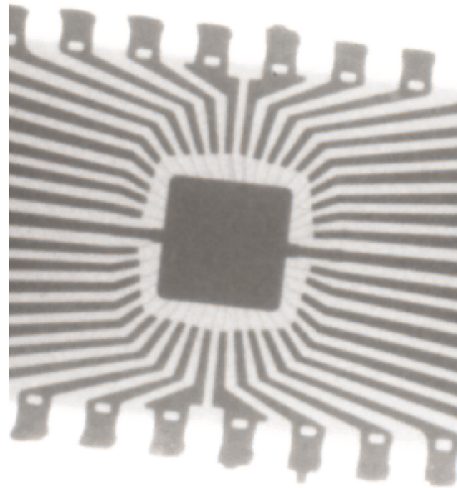


Figure 17. Chip X-ray denoising details

图 17. 芯片 X 射线去噪细节图

在原位 X 射线测试系统的设置中，除了图像增强器本身的固有辨别力之外，光学体系、收集系统的镜头调制函数，它们衡量了系统收集出的图像品质的辨别率[2] [3]。通过研究文章应用 JANUS 产品的 JF200 系列 CCD 摄像机，其辨别率是 1600×1200 ，能够符合系统需要。

在光线分辨率的帮助下，所有成像系统的分辨率逐渐明确，原位 X 射线检测系统的分辨率为我们选取一个射线分辨率卡，其型号为 luke Biomedical, Cleveland. OH07-521，美国制造，材质为铅板，厚度是 0.05 mm，检测范围为 2.0 LP/mm。实物图如图 18 所示。

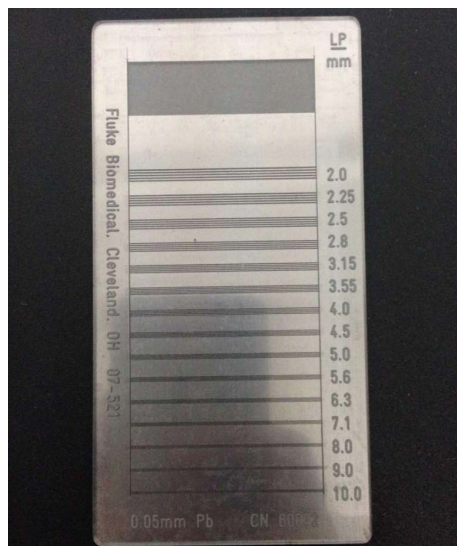


Figure 18. Ray resolution card physical map

图 18. 射线分辨率卡实物图

借助原位 X 射线检测系统对射线分辨率卡加以测验, 来明确这一系统的分辨率极值点, 图 19 和图 20 显示了 X 射线原始图像及其射线分辨率卡的去噪图。



Figure 19. X-ray original image of the ray resolution card

图 19. 射线分辨率卡 X 射线原图



Figure 20. X-ray denoising diagram of the ray discrimination rate card

图 20. 射线辨别率卡 X 射线去噪图

借助图 20 显示, 大家能够明确原位 X 射线测验体系的较大分辨率是 6.3 LP/mm, 也就是说我们设计这个检测系统能够在 1 mm 中分辨出 6.3 个线对。

可以看出使用 FPGA 硬件处理图像数据, 其速度处理很快, 而且相当便捷, 而且有良好的处理效。是我们在搭建改系统中不错的一个选择。

6. 结束语

随着人类的发展和需求的提高, 更高精度, 更小体积, 更多无损检测的技术蓬勃发展, 那就需要设备的硬件集成化, 软件系统化, 功能多样化。文章重点分析原位 X 射线检测系统的构成。阐述了 X 射线检测系统的构造, 涵盖 X 射线像增强器、mcp 准直器以及 CCD 相机分辨率, 对数字图像处理技术的研究, 实现对整个无损检测系统的优化, 具有一定的实际应用意义。

参考文献

- [1] 钱豫立. 图像增强技术在数字 X 射线医学影像中的应用分析[J]. 世界最新医学信息文摘, 2019, 19(38): 138+142.

-
- [2] 霍继伟, 刘泽, 苗宇, 李勇, 雷逸凡. 基于 FPGA 的在线电磁钢轨探伤系统[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(6): 89-91+95.
- [3] 王兵, 刘英, 王速. 图像处理技术在 X 射线检测中的应用研究[J]. 电子制作, 2016(16): 46.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7567, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: app@hanspub.org