



学 号：	23520101004
论 文 密 级：	公开
中图分类号：	TP311.5
学科分类号：	520.40
学 校 代 码：	90005

# 信息工程大学

## 工程硕士学位论文

基于 Matlab 的 X 光机安检图像处理方法  
研究与实现

论 文 作 者：	李佳欣
指 导 教 师：	吴灏 教授
申 请 学 位：	工程硕士
学 科 名 称：	软件工程
研 究 方 向：	数字图像处理
论文提交日期：	2015 年 10 月 15 日
论文答辩日期：	2015 年 12 月 22 日

解放军信息工程大学网络空间安全学院

二〇一五年十月



**A Dissertation Submitted to  
PLA Information Engineering University  
for the Degree of Master of Engineering**

**Research and Implementation of Image  
Processing for X-Ray Security System  
based on MATLAB**

Candidate : Li JiaXin

Supervisor : Prof. Wu Hao

**Oct. 2015**

## 原创性声明

本人声明所提交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表和撰写过的研究成果，也不包含为获得信息工程大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并标示谢意。

学位论文题目： 基于 MATLAB 的 X 光机安检图像处理方法研究与实现

学位论文作者签名： \_\_\_\_\_ 日期：        年        月        日

作者指导教师签名： \_\_\_\_\_ 日期：        年        月        日

## 学位论文版权使用授权书

本人完全了解信息工程大学有关保留、使用学位论文的规定。本人授权信息工程大学可以保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子文档，允许论文被查阅和借阅；可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密学位论文在解密后适用本授权书。）

学位论文题目： 基于 MATLAB 的 X 光机安检图像处理方法研究与实现

学位论文作者签名： \_\_\_\_\_ 日期：        年        月        日

作者指导教师签名： \_\_\_\_\_ 日期：        年        月        日

保密级别： \_\_\_\_\_ 保密年限：        年        月至        年        月

（保密委员会公章）

## 摘 要

随着社会的不断发展和科学技术水平的不断提高，安全稳定问题已成为世界各国关注的重点。目前，安检系统特别是双能量 X 光安检机在保证公共场所安全稳定工作方面发挥着重要作用。但由于技术水平的限制，X 光安检系统采集到的安检图像总是存在着噪声多、边缘模糊等影响辨识度的问题，需要采用图像处理系统对采集到的图像进行处理。因此，图像处理能力的强弱将严重影响安检系统对违禁危险品的检测精度。为了提高安检图像的质量从而提高针对危险品的检测精度，世界各国普遍加大了对于技术研究的投入，特别是图像处理系统方面的研究。

目前，物流系统货物安检也广泛采用 X 光机安检系统，物流系统货物具有货物量大、种类繁多和排列密集的特点，这就对 X 光机安检系统的安检精度和速度提出了更高的要求，本文正是在这一背景之下针对 X 光安检图像存在的模糊问题开展研究的，通过对 X 光安检系统的组成和成像原理与技术的分析，得出了 X 光安检图像的特征；结合物流系统 X 光安检图像的处理需求，设计了一种基于 FPGA 的 X 光图像处理系统，最后基于 MATLAB 对该系统功能进行了仿真验证，并得出了适合物流系统安检的图像处理算法流程。概括起来，本文的创新点主要有以下几点：

一、通过对物流系统 X 光安检图像的特征分析和基于 Matlab 的大量图像处理算法对比测试，找到了适用于物流系统安检图像处理的算法特征参数，为后续课题研究工作奠定了基础；

二、针对物流系统安检图像由于货物种类繁多和排列密集引起的噪声多和图像边缘模糊不清的问题，基于 MATLAB 对多种图像处理算法进行了仿真实验对比，提出了一种适用于物流系统 X 射线安检图像的图像处理算法流程，研究达到了预期的结果，提高了安检图像的质量；

三、针对物流系统安检由于货物量大而对安检速度要求较高的问题，在对比传统 X 光图像处理系统方案的基础上，提出了一种适用于物流安检图像处理的系统方案，该系统方案基于 FPGA 对 X 光图像处理进行实现，并基于 MATLAB 对方案进行了仿真验证，实验结果证明了方案的可行性和有效性，为方案的硬件实现奠定了基础。

**关键词：**X 射线，安检系统，双能量，图像处理，MATLAB

## Abstract

With the continuous development of society and the continuous improvement of the level of science and technologies, the security and stability problem has become the focus of the world. At present, the security systems, especially the dual energy X-ray inspection machines, play an important role in ensuring the safety and stability. However, due to the technical limitations of the security inspection system, the images collected by X-ray inspection system always have many problems such as noise, edge blur and so on. The ability of image processing seriously restricts the detection accuracy of the inspection system. In order to improve the quality of the images and the detection accuracy of dangerous goods detection technology, the world has increased the investment in technology research, especially the research of image processing system.

Under this background, aiming at the fuzzy problem of the X-ray images, through the analysis of the system composition and the imaging principle and technology, we obtained the characteristics of the X-ray images. According to the processing requirements of the X-ray, an image processing system based on FPGA is designed. We also simulate the image processing system by using MATLAB programming tools. To sum up, the main innovations of this paper are as follows:

1. Based on the analysis of the X-ray system composition and the imaging principle and technique, we summed up the characteristics of the X-ray images. This laid the foundation for the follow-up research work;
2. Aiming at the problems that the security images have such as noise, edge blur and so on, an image processing system based FPGA is designed, and the system is verified by simulation based on MATLAB;
3. Based on the analysis and summary of the existing image processing algorithms, combined with the image features and security system imaging principle, we conducted image processing algorithm simulation experiments based on the MATLAB, and proposed an image processing algorithm combination which is more suitable for X-ray image at the best. The image processing algorithm combination can improve the quality of the inspection images.

**KEY WORDS :** X-ray, security detection system, Dual-energy, image processing, MATLAB

# 目 录

摘 要.....	I
Abstract .....	II
目 录.....	错误！未定义书签。
图 录.....	V
表 录.....	VI
第一章 绪论 .....	1
1.1 课题研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.3 论文的主要研究内容.....	4
1.4 论文的组织结构.....	5
第二章 X 光机系统组成及成像原理与技术 .....	6
2.1 X 光机系统组成 .....	6
2.1.1 X 射线发生部分.....	6
2.1.2 X 光机成像部分.....	7
2.2 X 光机的成像原理 .....	9
2.2.1 单能量 X 射线物体识别原理 .....	9
2.2.2 双能量 X 射线物体识别原理 .....	10
2.3 X 光机的成像技术 .....	10
2.4 本章小结.....	11
第三章 X 光图像特征及处理算法研究 .....	12
3.1 X 光图像特征分析 .....	12
3.1.1 X 光图像质量分析.....	12
3.1.2 X 光图像噪声分析.....	13
3.2 现有的图像处理算法研究.....	14
3.2.1 图像去噪算法 .....	14
3.2.2 图像恢复算法 .....	18

3.2.3 图像增强算法 .....	19
3.2.4 图像锐化算法 .....	19
3.2.5 图像分割算法 .....	22
3.2.6 形态学处理 .....	25
3.3 本章小结 .....	26
<b>第四章 基于 Matlab 的 X 光安检图像处理研究及实现 .....</b>	<b>27</b>
4.1 引言 .....	27
4.2 系统方案设计 .....	27
4.2.1 图像处理系统的研究现状 .....	27
4.2.2 基于 FPGA 的图像处理系统方案设计 .....	28
4.3 X 光图像处理系统功能实现及仿真 .....	29
4.3.1 仿真工具及方法 .....	29
4.3.2 图像去噪算法仿真 .....	30
4.3.3 图像恢复算法仿真 .....	35
4.3.4 图像对比度增强算法仿真 .....	36
4.3.5 图像锐化算法仿真 .....	37
4.3.6 图像分割算法仿真 .....	39
4.3.7 仿真结果分析 .....	42
4.4 系统测试 .....	43
4.5 本章小结 .....	43
<b>第五章 总结与展望 .....</b>	<b>44</b>
5.1 总结 .....	44
5.2 展望 .....	45
<b>致 谢 .....</b>	<b>46</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>47</b>
<b>作者简介 .....</b>	<b>错误！未定义书签。</b>



## 图 录

图 1 X 光机安检系统组成.....	6
图 2 X 射线发生器工作原理.....	7
图 3 X 光机工作流程示意图.....	8
图 4 闪烁探测器.....	8
图 5 双能量 X 射线探测器.....	11
图 6 图像退化/恢复模型.....	19
图 7 DSP 图像处理机制.....	28
图 8 基于 FPGA 的图像处理系统方案.....	29
图 9 原始图像.....	31
图 10 均值滤波算法流程图.....	32
图 11 均值滤波处理后的图像.....	33
图 12 中值滤波算法流程图.....	34
图 13 中值滤波处理后的图像.....	34
图 14 小波去噪原理.....	35
图 15 小波去噪流程.....	35
图 16 小波去噪处理后四位图像.....	36
图 17 盲区卷积处理后的图像.....	37
图 18 消除振铃处理后的图像.....	37
图 19 对比度增强处理图像.....	38
图 20 Prewitt 算子处理后的图像.....	39
图 21 Sobel 算子处理后的图像.....	39
图 22 拉普拉斯算子处理后的图像.....	40
图 23 阈值分割图像.....	41
图 24 阈值分割后形态学处理图像.....	41
图 25 区域生长法分割图像.....	42
图 26 区域生长法分割后形态学处理图像.....	42
图 27 伪彩色图像.....	43
图 28 最佳算法组合流程图.....	44

表 录

表 1 图像去噪算法对比分析.....18

表 2 图像锐化算法对比分析.....23

表 3 两种算法流程的测试结果对比.....44

## 第一章 绪论

### 1.1 课题研究背景及意义

当前,随着我国经济社会水平的不断提高和国家综合实力的日益增强,人员流动交流日渐频繁,乘坐共同交通出行如地铁、飞机、高铁等更是家常便饭。这些便捷的交通工具在方便人们日常生活的同时,却带来了一系列的安全问题。这些安全问题严重扰乱社会秩序和威胁人们的生命财产安全。因此,大部分国家都十分重视危险品的安全检查工作,投入了大量的人力和物力。然而,由于安检工作涉及的领域广泛,影响面大,所以就要求安检设备能够安全准确地检测出危险品,这就对安检设备的检测技术提出了更高的要求。检测技术既要最大限度地保证危险品检测的方便快捷,同时又要尽可能地提高检测的精度,最大程度的防止危险事件的发生。因此,危险品检测技术就成为科研人员研究的热点之一。

全球范围内的安全问题始终是世界各国关注的重要问题,为了防止安全问题的发生,世界各国都在关键场所部署安检设备。目前常用的安检设备都是采用 X 射线检测仪。X 射线检测仪最早应用于医学检测领域,本质是通过 X 射线达到检测的目的。但随着技术的不断发展和应用范围的不断扩大,X 射线逐渐被应用到安检设备中用于检测危险品,在大型的公共场所,如地铁站、飞机场、高铁站、物流等,都可以见到安检设备的身影<sup>[1]</sup>。采用 X 射线安检设备对物体进行检测时,在不打开行李的情况下通过显示屏可以直接看到行李中的物体图像,从而可以判别行李中是否有危险品,采用这种检测方法既方便又快捷,更重要的是安全,因此是目前大部分检测危险品所用到的安检装置之一。X 射线检测技术是根据 X 射线穿透物体所衰减的能量来鉴别各种物质,不同的物质 X 射线穿透后所衰减的能量不同,这为检测区分各种不同物质提供了可靠的依据<sup>[2]</sup>。

早期的安检设备只采用了单一能量的 X 射线检测物体,在实际检测过程中发现,其难以区分识别“厚但吸收射线能力弱”以及“薄但吸收射线能力强”这两类不同物质,因此对于藏匿在密度高的物质背后的物体不容易被检测出来。目前有一种双能量 X 射线物体识别技术能够解决上述所遇到的问题,此种技术是一种非常实用的物体投影成像技术<sup>[3]</sup>。双能量 X 射线安检设备通过产生两种不同能量级的 X 射线,其中一个是高能量,另外一个低能量。不同的物质在两种能量 X 射线穿透后所衰减的能量不同,所以可以根据这个特点来识别不同的物质,利用高低能 X 射线的能量衰减比来达到检测违禁品的目的。至于其中可能会遇到的遮挡物体不容易被检测的问题,可以从不同的方向利用 X 射线照射同一个物体来解决。

尽管 X 射线安检设备是透过物体来采集相关图像,但受各种因素的影响采集到的图像可能会产生大量的噪声并且会存在物体边缘不明显的情况,这些情况会使得采集的物质图像不清晰,影响安检人员对物体的判断。因此,为了进一步提高安检设备的检测精度,有

必要对 X 射线采集的图像进行进一步的处理，以便得到更加清晰的图像，方便安检人员辨别。

为了更好地发挥安检设备的优势，目前，国内外除了对 X 射线安检设备中的 X 光成像系统进行深入研究外，同时也展开了对图像数字处理技术的研究，力争在这两个方面同时取得相关研究成果，应用于安检设备中。在数字图像处理方面，重点研究的是实时精确的图像处理技术，最终达到减少图像的噪声，突出物质的边缘，提高图像的清晰度，大大提升采集物质图像质量的目的。

数字图像处理技术的发展给图像处理带来了以下好处：一是在经过数字图像技术处理以后，图像的质量会明显提高，更利于人眼进行辨别和检查，而且经过处理以后的图像可以永久保存，也可以方便地进行传输、复制，而不会影响图像的整体质量；二是可以采用数字图像处理技术从图像中提取一些有用的信息特征，进而对图像进行分析，并可对图像进行还原，数字图像处理的多项技术对应各种不同的处理功能，能实现对图像进行各种非线性或者线性数字处理功能<sup>[7]</sup>。数字图像处理主要包括图像去噪、图像恢复、图像边缘突出、图像特征提取等，通过这些技术的运用，能最终提高图像的质量。而且相对经常更换检测机的性能器件，运用数字图像处理技术花费的成本也很低。综上所述，为了最终得到一幅清晰的图像，对安检图像进行数字图像处理是很有必要的。

另外，不同于一般拍照图像的处理，X 光安检机采集的物质图像具有自身的特征，要根据这些特征采用与其相适应的处理技术。X 光图像常用的数字图像处理技术主要有函数变化、对比度拉伸、图像去模糊、图像去噪、图像锐化等图像清晰化技术，以及图像分割、形态学处理等区分物质的技术。根据 X 光图像本身的噪声特性，常用的图像去噪算法有均值滤波、小波去噪、插值滤波、中值滤波等；图像锐化一般采用一阶微分算子法、二阶微分算子法等处理算法；图像分割主要采用采用阈值分割算法、区域生长分割算法等。在图像处理的过程中我们把破坏图像清晰度的噪声视为多余东西，但是我们在实际采集图像的过程中不可能实现无噪声图像，所以我们在图像去噪时把实现噪声最小化作为最终目的。在采集过程中我们也会遇到物质的边缘模糊不清的问题，这时采用图像锐化技术就能很好的突出物质边缘，以更好地区分不同属性的物质<sup>[8]</sup>。

在实际的安检过程中，既要准确检测出危险品，同时又要保证不能损坏正常的物品，而 X 射线检测技术能够很好的解决这个问题。多年的科研实践成果为我们提供了 X 射线检测技术的改进和创新，也为最终生产制造出高性能的 X 射线安检机提供了巨大的帮助和支持。衡量高性能的 X 射线安检机一个很重要的指标就是检测图像能够清晰可辨，所以我们必须对图像进行进一步的数字图像处理，即优化 X 射线安检机的图像处理系统，提高图像的质量，为安全准确的区分出危险品提供有效的检测手段，这就是课题研究的意义所在。

论文来源于我单位承担的“物流系统货物 X 光安检关键技术研究”课题。当前，随着我国经济社会发展水平的不断提高，对外经济活动日益增多，物流发挥着越来越重要的作

用。物流货物具有货物量大、种类繁多和排列紧密的特点，既要保障正常的社会经济活动又要拦截非法货物，如何快速准确地对物流货物进行安检就成为物流系统面临的严峻挑战，对物流安检系统提出了更高的要求。但由于 X 光机本身存在的成像缺陷，需要对图像进行后期处理，以得到适合安检人员观察的图像，这就进一步加剧了物流安检系统研制的难度。目前物流系统广泛应用的安检系统也是 X 光机，在 X 光成像系统方面，与传统 X 光安检系统无异，物流安检系统由于自身的特点，对图像质量要求更高，这就需要后期的图像处理技术更具有针对性，设计更加合理的图像处理流程，以期得到更加清晰图像。因此，针对物流系统货物安检的特点，需要研究适合物流安检系统的图像处理算法，以弥补原始 X 光机安检系统的先天不足。

本文正是在这一背景之下，针对物流系统货物的特点，对物流 X 光安检系统中的图像处理关键技术进行了深入研究，通过分析物流系统 X 光安检图像，得到图像特征，基于 Matlab 对大量的图像处理算法进行了对比测试，找到了适合物流安检图像的算法参数；在此基础上，针对物流系统安检图像由于货物种类繁多和排列密集引起的噪声多和图像边缘模糊不清的问题，基于 MATLAB 对多种图像处理算法进行了仿真实验对比，提出了一种适用于物流系统 X 射线安检图像的图像处理算法流程；并针对物流系统安检由于货物量大而对安检速度要求较高的问题，在对比传统 X 光图像处理系统方案的基础上，提出了一种适用于物流安检图像处理的系统方案，该系统方案基于 FPGA 对 X 光图像处理进行实现，并基于 MATLAB 对方案进行了仿真验证。虽然由于本课题的工作量大，研究时间有限，没能在硬件上实现 X 光机安检图像处理系统，但本课题的研究成果证明了方案的可行性和有效性，为硬件实现奠定了基础。

## 1.2 国内外研究现状

目前，国内外都在对 X 射线物体识别技术开展研究，但国内起步较晚，研究和应用水平也远远落后于国外。由于国内对 X 射线物体识别技术的研究各方面都不成熟，虽然也有如清华同方威视公司和公安部第一研究所等机构可以生产 X 射线安检设备，但高端先进的 X 射线安检设备还需从国外进口。国外著名的 X 射线安检设备生产厂家主要有芬兰的 METOREX 安全产品公司、德国 Heiman 公司以及美国的 PerkinElmer 公司等。这些公司生产的产品占有全球至少一半以上的市场，虽然价格不菲<sup>[4]</sup>，但这些安检设备的检测精度较高，而且实时性较好。为了应对日益严峻的安全问题，研究人员研究了许多种类型的 X 射线安检设备，本质上都是基于 X 射线透射技术，但这些设备也仅能区分有机物和无机物，对于更精确的危险品分类无能为力，需要进行更进一步的深入研究。

总体来说，我国目前对 X 射线物体识别技术的研究还不是十分充分，各方面都不够成熟，需要追赶国外的地方还有很多，国内生产的安检设备价格虽然便宜，但检测的准确性和实时性还有待提高；国外在 X 射线物体识别技术方面的研究比较成熟，其生产的安检设备检测准确率高且实时性强，但碍于知识产权的保护，产品价格昂贵，普及起来也十分

困难。所以这样的市场格局为我国发展高性价比的自主品牌提供了难能可贵的商业机遇，要想提高自身产品的市场占有率，就必须研发设计出精度更高、实时性更好的 X 射线安检设备，这样对于社会和公司本身都能达到双赢的结果<sup>[5]</sup>。

随着 X 射线物体识别技术的不断发展，未来会有更多类型的 X 射线安检设备，同时检测的精度和实时性会更强，对相近危险品如炸弹、火药等的区分会更加有效和安全。未来 X 射线安检设备会朝着更加智能或者更高级的神经网络的方向发展，相信不久的将来可以借助计算机图像的数字化帮助人类来检测图像。同时由于数字图像处理系统的快速发展，X 射线安检设备内的图像处理器也会越来越小型化和先进化。随着计算机技术的快速发展，数字化处理技术逐渐成为科学研究领域一门重要的技术领域。它的应用也十分广泛，例如应用于医学、工业、教育及交通等领域，它为社会带来了巨大的变化，促进了经济发展。

计算机的处理速度因为半导体技术的快速发展而越来越快，存储的速度和容量也越来越大。目前，数字图像处理技术在 PC 端的应用普及率相当高，而且很实用，处于一个快速平稳发展的阶段。大量的科研人员和图像处理芯片生产厂家合作研发出新的先进的图像处理芯片，他们的目标是让芯片更小、更快、更精。更小就是体积越来越小，更快当然就是芯片处理速度越来越快，精指的是功能越来越多而且功耗越来越低。但有一些专用图像处理芯片对于用户来说会带来灵活性差、开发成本高、更新换代慢等问题。所以有些芯片生产厂家也会在通用处理器中加入专用处理芯片的特殊结构，可以很好的解决上述问题，而且还可以使芯片的功能更多，数据处理速度更快，使芯片成为名副其实的物美价廉产品。这类芯片较为出名是 TI 公司生产的 DSP 芯片和 ALTERA 公司生产的 FPGA 芯片，它们生产的处理器大部分都能符合上述物美价廉这个形容词。图像处理系统的不断增加也为数字图像处理芯片的发展带来了新的契机。实践证明，数字图像处理技术对于噪声多模糊图像有很好的改善功能<sup>[6]</sup>。

因为产生 X 射线的光源也会对 X 射线物体识别技术的准确率产生影响，所以我們也可以通过改变光源的性能来提高物体识别技术，使 X 射线通过物体后产生的噪声更少，X 射线穿透过程更稳定。未来产生 X 射线光源的设备会让用户更容易操作、体积更小。

总的来说，未来 X 射线安检设备的发展一定会很迅速，因为它所涉及的技术领域很广泛，同时危险品的检测对于维护社会的安全稳定发展起着不可或缺的作用。未来的安检设备一定会朝着检测率更精确、处理速度更快、功能更强大、价格更低廉的趋势发展。

### 1.3 论文的主要研究内容

本文的主要研究内容包括以下四个方面：

第一，首先通过对课题相关研究的调研，明确了课题研究的背景和意义；其次对 X 射线安检设备及其相关技术研究现状进行了详细了解和阐述，并对比了目前国内外安检技术的优缺点，得出未来安检设备的发展趋势；最后明确了课题研究的目标是对物流安检 X 光图像进行数字图像处理，得到更加清晰、物质分辨更好的图像。

第二，首先介绍了 X 射线安检系统的主要组成，包括 X 射线发生器模块和 X 光机成像模块；其次详细描述了 X 光机的成像原理，包括单能量和双能量 X 射线物体识别技术原理；最后对 X 光机的成像技术进行了分析。

第三，对物流安检 X 光图像特征和现有的图像处理算法进行了分析和对比。首先分析了 X 光图像的各种特征以及影响图像质量的各种因素，并对 X 光图像噪声的来源和类型进行了分析总结；其次结合 X 光图像存在的问题，对现有的图像处理算法进行了调研和分析，并对比了各种图像处理算法的特点，指出了各种算法的应用场景。

第四，在以上研究的基础之上，基于 FPGA 和 Matlab 设计和实现一种物流安检 X 光机图像处理系统，该系统应用研究得出的图像处理算法流程，能够同时较好的实现图像去噪、图像恢复、图像对比度增强、图像锐化、图像分割等方面处理效果，为最终提高 X 射线危险品检测技术的准确率提供了一定的帮助。

### 1.4 论文的组织结构

第一章对课题研究的背景、意义以及相关的研究现状进行了介绍，指出了课题研究的目标，给出了课题研究的主要内容和论文组织结构。

第二章对 X 射线安检系统的组成部分、成像原理以及成像技术进行了详细介绍。

第三章对物流安检 X 光图像本身的特征进行了研究，并分析了影响图像质量的各种因素，然后对现有的图像处理算法进行了综述。

第四章设计了一种基于 FPGA 的 X 光图像处理系统方案，并介绍了 FPGA 硬件设计在 MATLAB 中的实现，基于 MATLAB 图像分析处理工具对现有的数字图像处理算法进行了详细的实验分析和对比，最终得出了适用于物流系统安检的 X 光图像数字处理算法，为 X 射线安检设备的准确性和实时性奠定了基础。

第五章是总结和展望，分析了课题研究的不足之处，并对未来课题的可能的研究内容进行了展望。

## 第二章 X 光机系统组成及成像原理与技术

### 2.1 X 光机系统组成

X 射线安检系统非常复杂，涉及到多个学科领域。目前市场上有各种类型的 X 射线安检设备，但不论何种类型的 X 射线安检系统，其核心都包含两个重要的部分：X 射线发生部分和成像部分。图 1 给出了 X 光机安检系统的组成和简单的工作原理。

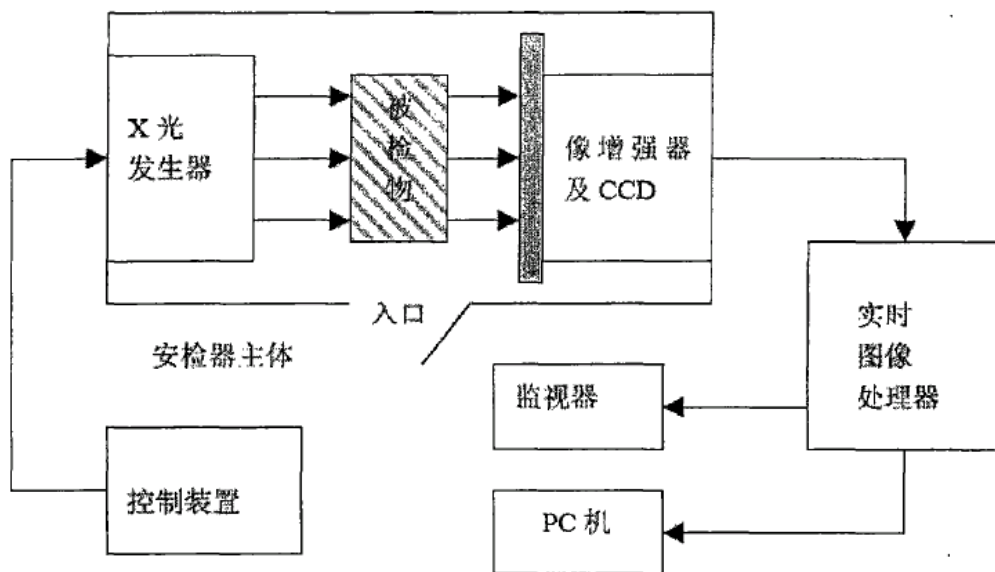


图 1 X 光机安检系统组成

#### 2.1.1 X 射线发生部分

X 射线发生器的工作原理如图 2 所示，接通电源以后，控制装置首先对电流进行降压，并将降压后的电流流入 X 射线管阴极灯丝加热，随即产生自由热辐射电子。在升压器的作用下，X 射线管的阳极会产生巨大的高压，由于巨大的高压作用，自由电子便会迅速的飞向阳极，之后与阳极发生碰撞反应，速度急速递减下来，同时损失掉自身所有的能量，其中很小一部分能量以光子形式由 X 射线发射窗口辐射形式散发出去，其它的能量则以热能的形式散发出去<sup>[9]</sup>。

X 射线发生部分的核心是 X 射线发生源，其主要是由 X 射线管、高压发生器和灯丝供热器三部分组成。其中 X 射线管也是 X 射线发生源的核心部分，X 射线管的好坏直接影响到 X 射线发生器乃至整个安检设备，X 射线安检机的关键性能指标和电路设计思路都得按照它来进行设计。X 射线管中的电压和电流等因素直接决定了 X 射线管质量的优劣。

X 射线管中的电压是由高压发生器提供的，电流则是由灯丝供热器提供，他们都可以通过操控电路来保持平稳。实际应用中因为有一部分物体需要硬度大的 X 射线才能穿透，相反一部分物体需要低穿透力的 X 射线就能穿透，所以我们必须适当的改变 X 射线发生源产生的 X 射线硬度，这样可以通过改变电压来实现，从而可以提高检测准确率。整个 X 射



线管是与空气完全隔离的，这样做的目的是为了防止高压泄露，同时也有助于散热<sup>[10]</sup>。

由于 X 射线发生器始终处在工作电压、强电流的工作环境中，为了让系统能够稳定安全的工作，需要加入一个高压冷却系统。此系统的作用就是冷却 X 射线发生装置中的器件，它的原理是利用变压器中的油来达到冷却的目的，其它的冷却方法还有诸如利用气体绝缘等。但是对于更强的系统来说，还需要在外部配备一个冷却系统<sup>[11]</sup>。

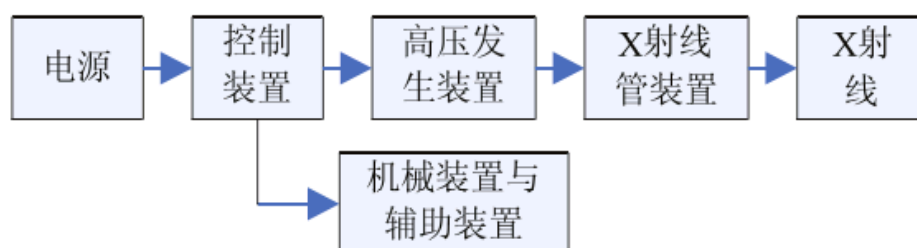


图 2 X 射线发生器工作原理

与一般的可见光相比，X 射线的波长较短，因而穿透力较强，但在穿透物质的过程中会伴随着能量的衰减。X 射线管装置通过电压控制着 X 射线的波长，电压越高，X 射线的波长越短，穿透能力就越强。除了 X 射线本身的穿透能力，在实际应用时，穿透能力还跟被检测物体本身的属性如密度和厚度等有关。

如上所述，X 射线是否能够穿透物体直接决定了能否采集到物体的图像。显而易见，如果采用单一波长的 X 射线，由于穿透过程中的能量衰减，采集图像的效果就不好；相反如果采用多种波长的 X 射线同时照射，能量衰减的影响就会降低。因此，在实际应用过程中，大多数 X 射线安检系统都是采用多波长 X 射线检测危险品<sup>[9]</sup>。

### 2.1.2 X 光机成像部分

如图 3 所示，X 光机成像部分主要包括图像采集、图像处理以及图像显示三个组成部分，这三部分组成一个完整的 X 射线安检系统成像部分。每个部分都对应不同的器件，下面分别进行阐述。

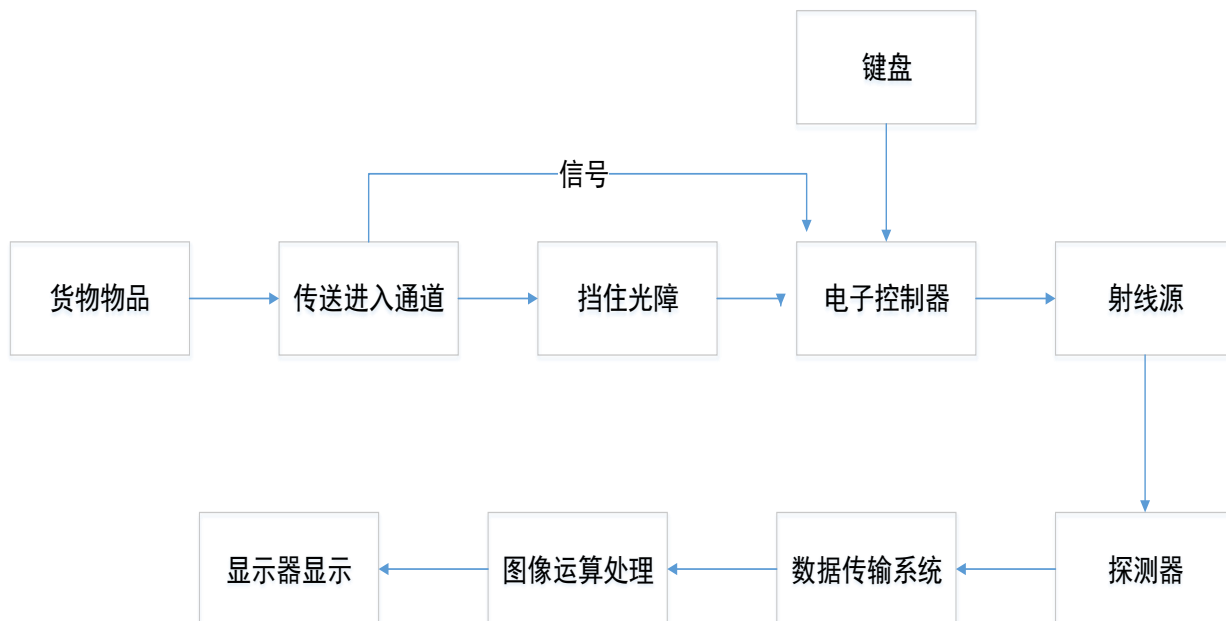


图 3 X 光机工作流程示意图

### 1. 图像采集器件

目前常用的图像采集器件为闪烁探测器，在采用 X 射线对物体进行照射以后，闪烁探测器负责探测穿透物体的 X 射线，探测过程本质上就是要把 X 射线变换为更易于后面图像处理的电信号的光电转变过程。

如图 4 所示，闪烁探测器主要由无机闪烁体铀晶体和光电二极管两部分组成。其中铀晶体负责在极短的时间内吸收 X 射线转变为可见光，当 X 射线穿透安检物体之后照射到探测器上时，所采集的图像在很短的时间内转变为电信号。光电二极管代表图像中的一个像素，它的作用则是把那些很弱的光信号转变为容易进行分析处理的电信号。

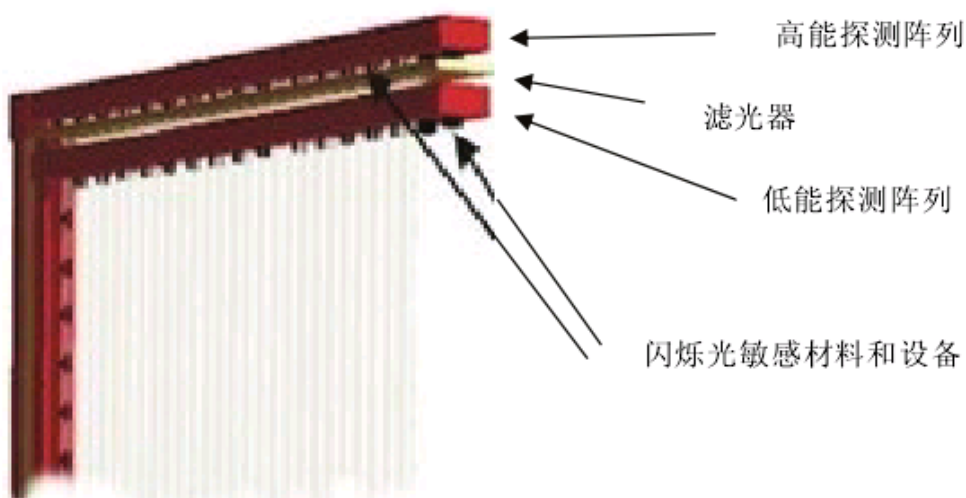


图 4 闪烁探测器

### 2. 图像存储与处理器件

经过图像采集器件采集到的图像一般不直接用于显示，这是因为采集到的图像可能还

存在很多噪声和边缘不明显等问题，需要对图像进行进一步的处理。而图像存储与处理器件就负责对采集的图像进行处理，提高图像的清晰度，便于安检人员更准确地检测危险品。

### 3. 图像显示器件

图像显示是 X 射线安检系统的最后一步。检测目的就是要显示给安检人员观看，因此，为了更好地显示物体图像，安检系统一般都尽可能采用更高分辨率的显示屏。目前，常用的显示屏都是采用一列列扫描被检物体的方式进行显示，这样不仅可以尽可能减少噪声影响，还可以采集图像过程中抖动对图像的影响。在显示图像时，为了对不同物体进行区分，可以对不同的物质分别赋予特定的伪彩色，这样工作人员对于分辨物质就能通过屏幕上不同的颜色来识别不同的物质。但这样还需安检人员通过辨别物体的形状来判断危险品，存在一定程度的误判。未来随着科学技术的不断发展，计算机逐渐代替人工进行物体识别，不仅能够大大提高安检的工作效率，而且对危险品的检测精度也会越来越高<sup>[12]</sup>。

## 2.2 X 光机的成像原理

X 射线安检系统依赖 X 射线穿透物体形成物体的图像分辨是否为危险品，这其中最关键的就是 X 光机的成像，只有弄清楚 X 光机的成像原理，我们才能进一步地研究提高成像的清晰度。根据 X 射线实际的应用情况来看，检测物体的准确率与物体本身的组成有关，组成物体的物质原子序数越大，检测的准确率就越高，也就是说与原子序数大小成正比。一般来说，组成有机物的元素原子序数小于 10，而无机物的元素原子序数大于 18，而诸如炸弹等危险品一般为有机物，识别的准确率偏低，而普通的铁质金属危险品的识别率就相对高一些。另外一方面，早期的 X 射线安检设备大多采用单能量 X 射线，存在较大缺陷，检测相对简单、容易识别的危险品效果还可以，但随着危险品种类的不断增多，单能量 X 射线安检设备越来越难以满足需求，因此双能量 X 射线安检设备就自然而然的出现了。

### 2.2.1 单能量 X 射线物体识别原理

受技术条件的限制，早期安检设备大多采用单能量 X 射线，这种 X 光机安检设备主要是通过 X 射线获得物质的密度和物体的边缘特性，并赋予不同物体不同的伪色彩进行区分，从而达到检测物体的目的。

X 射线穿透物体时会伴随着能量的衰减，不同的物体能量衰减不同，因此，可以依据此来区分不同的物体。假设用原始能量为  $I$  的 X 射线照射一个厚度为  $\delta l$  的物体，能量强度衰减了  $\delta I$ ，因此，可以得出以下等式：

$$-\delta I / I = \sigma_n \delta l \quad (1)$$

假设穿透物体后的强度为  $I_0$ ，则又可以得到如下等式：

$$I = I_0 e^{-\sigma_n l} \quad (2)$$

但这种单能量的 X 射线在遇到原子序数较小的物体时，特别是将危险品藏于原子序数较大的物体后面时检测效果较差，具有较大的局限性。而且单能量 X 射线采集到的黑白物质图像也只是简单的区分不同物质衰减 X 射线能量的大小不同，最后只能简单的利用人眼根据物体的形状来区分不同的物体，这种方法对于无机物与有机物的区别基本没多大作用，目前市场上使用的安检机多为双能量 X 射线系统。

### 2.2.2 双能量 X 射线物体识别原理

大量的科学研究证明，当 X 射线穿透物体时，X 射线与物体之间会发生一系列的相互作用，主要有光电效应、康普顿散射以及电子对效应，其中光电效应占大部分。这三种相互作用对结果影响的比例大小与 X 射线的能量大小有关系，不同的 X 射线能量对应产生不同比例的三种相互作用<sup>[13]</sup>。其中双能量物体识别技术就是利用前两种相互作用的不同来提高图像的辨识度从而提高危险品的检测率。

与单能量 X 射线物体识别技术不同，双能量 X 射线物体识别技术是利用两种高低不同能量的 X 射线穿透同一物体，根据穿透的两种 X 射线衰减程度的不同进行对比分析，进而得到相应的物质原子序数，这种检测方法可以大大提高危险品检测精度。

在计算物质的原子序数之前，我们必选首先计算出有效原子序数 R，R 值是危险品检测的一个重要指标。R 值计算公式如下：

$$R = \ln(T_L / T_{L0}) / \ln(T_H / T_{H0}) \quad (3)$$

在式（3）中， $T_{H0}$ ， $T_{L0}$  分别代表高能、低能 X 射线穿透物质前的能量， $T_H$ ， $T_L$  分别代表高能、低能 X 射线穿透物质后的能量。在得出 R 值以后，可以根据以下公式计算出有效原子序数  $Z_{eff}$ 。

$$Z_{eff} = 6.59 \times 10^{-9} \cdot 81.5 + 4.685^R \quad (4)$$

## 2.3 X 光机的成像技术

随着安全形势的日益严峻和扫描成像技术的不断发展成熟，X 射线安检设备应用的领域和范围越来越广泛。从最早的单能量 X 射线安检设备到日益成熟的双能量 X 射线安检设备，安检设备在人们的日常生活中无处不在。

早期的单能量 X 射线主要用于检测金属危险品如管制刀具、枪支等危险品，主要采用扇形 X 光束，扇形 X 光束穿透物体的同时，线性阵列探测器记录穿透的 X 射线能量值。并根据能量值形成物体图像。但单能量 X 射线成像技术所显示的图像为黑白图像，而且对有机物和无机物的区分不够。

双能量 X 射线成像技术则是利用两种高低不同能量的 X 射线穿透同一物体，并将穿透的两种 X 射线进行光电转换，输出两种不同信号，在对信号进行数字图像处理以后，可以

得到被检测物体的等效原子序数和物质密度等特性的信息，最终可以在显示器上显示 X 射线检测得到的图像。通过双能量 X 射线成像技术获得的图像，如果再辅以图像分割方法，就能够有效地区分开有机物和无机物，便于安检人员对违禁危险品进行分辨和识别，特别对于检测一些诸如炸弹、毒品等难检测的物质具有一定的效果，它的应用领域也逐渐在扩大。

X 射线的能量与波长有关，成反比，能量越大，波长越短。双能量 X 射线正是利用这一点，采用两种能量大小不同的 X 射线同时对物体进行透射，并采用具有高低两层检测阵列的双能量探测器对透射的 X 射线进行探测，产生两幅独立的针对同一物质的检测图像。双能量探测器的简单工作原理如图 5 中所示，透射的 X 射线首先到达低能检测阵列，低能检测阵列吸收完低能 X 射线以后，其余的 X 射线送到高能探测阵列，高能探测阵列负责吸收高能 X 射线。

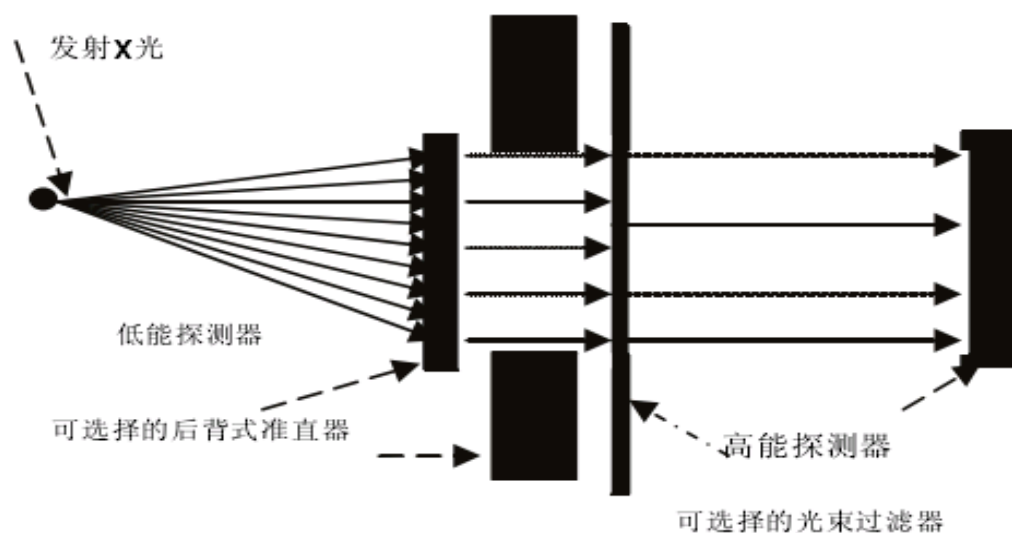


图 5 双能量 X 射线探测器

## 2.4 本章小结

本章对 X 光机的系统组成及成像原理与技术进行了介绍，首先主要从 X 射线发生和 X 光成像两个核心部分详细阐述了 X 光射线安检系统；其次从 X 射线安检系统的发展历程角度，详细介绍和对比了单能量和双能量 X 射线安检设备的成像原理与技术，指出了双能量 X 射线安检系统的优势，为后续研究奠定了基础。

### 第三章 X 光图像特征及处理算法研究

要对 X 光图像进行处理,首先要弄清楚 X 光图像与其它图像相比具有哪些重要特征,这样才能有针对性地选择算法进行处理。本章首先探讨了物流系统安检 X 光图像的特征,然后结合这些特征,对现有的 X 光图像处理算法进行了讨论。

#### 3.1 X 光图像特征分析

与一般拍摄的图像不同, X 光图像是通过 X 光透射物体后获得物体的密度和原子序数而形成的物体图像。这种图像的质量好坏直接决定了安检的准确率。因此,需要对 X 光图像的特征进行深入分析,以便进一步对图像进行处理,提高图像的清晰度。

##### 3.1.1 X 光图像质量分析

X 射线安检系统的最终目标是通过 X 射线透射采集到的物质图像来判断是否为违禁危险品,图像包含着重要的信息,图像的质量好坏直接决定了安检系统最终检测的准确率。影响检测图像质量的因素有很多,比如 X 射线安检系统本身的性能等,但评价一副图像质量的好坏,常用的指标主要有图像对比度、模糊度、噪声等,因此,本节就从这三个方面对 X 光图像的质量进行分析。

###### 1.对比度

对比度是衡量图像质量的一个重要指标,所谓对比度是指图像背景与图像细节之间的灰度差。图像对比度直接决定了图像细节的可识别性,影响图像对比度的因素主要有被检物体的特性、物体的厚度和密度等。图像对比度与物体厚度成正比,与物体的密度成反比。影响图像对比度的因素主要有散射线、X 射线能量大小等,在穿透物体时 X 射线会发生散射,散射的方向也会影响采集图像的对比度,如果发生散射的方向不是特别稳定,就会降低采集图像的对比度。另外,图像对比度也会受 X 射线能量大小的影响,这是因为 X 射线能量的大小直接关系到穿透物体时发生光电效应的概率大小。图像对比度可以根据以下等式进行计算:

$$c = r \cdot \Delta B \quad (5)$$

其中式(5)中  $\Delta B/B$  表示图像亮度比,  $r$  表示系统灰度系数,  $c$  表示图像的对比度。从公式中可以看出,图像对比度与图像亮度比成正比,可以通过提高图像的亮度比来增强图像的对比度。

###### 2. 模糊度

在 X 射线安检系统中,图像的清晰度是由图像的模糊度来衡量的,图像模糊度是指图像的“不清晰度”,是影响图像质量的一个重要指标。通过 X 射线采集到的图像会不可避免的出现一定程度的模糊,特别是被检测的物体处在运动状态、X 射线管焦点的尺寸、X 射线检测器的厚度等等都会引起图像不同程度的模糊,改变图像的整体对比度,从而影响

图像的辨识度，所以必须尽量改进图像的模糊发生来提高图像的质量，从而提高危险品检测精度。图像的清晰度可以通过图像处理以降低图像模糊度的方法来提高。

### 3. 噪声影响

噪声是影响图像质量最主要的因素，从安检系统的组成可以看出，图像的噪声可能来源于系统的每一个环节。

为了提高图像的质量，就要想办法去除图像中的噪声，去除噪声是图像处理的重中之重，进行图像处理的目的是增强图像的对比度和改善图像的清晰度。

另外，在采用 X 射线采集物体图像时，采集的图像可能会发生伪影和畸变现象，造成图像伪影的原因是增感屏和滤线栅的颜色，被检物体摆放位置和厚薄检测部分距离不一样是造成图像畸变的主要原因，厚的部分比较容易发生畸变<sup>[15]</sup>。

#### 3.1.2 X 光图像噪声分析

如前所述，影响图像质量最重要的因素是噪声，而噪声在系统采集图像的整个过程中都会或多或少的产生，这在前面阐述 X 射线安检系统的成像技术原理中已经介绍。X 光图像的产生需要经过两个过程，一个是光电转化过程，另一个是电子倍增过程。比如因为 X 射线剂量小而加入的像增强器所产生的电子噪声和离子噪声，还有 X 射线本身的量子噪声，这种噪声是随机分布在图像的二维空间上，噪声的多少取决于 X 射线的量大小，X 射线量越大，量子噪声就越少。另外线路传输等过程以及稀土增感屏等设备也会产生大量的噪声从而影响图像的整体质量。

根据噪声来源的不同，可以对 X 射线安检系统的图像噪声进行分类，大体上可以分为以下几种：

##### 1. 量子噪声

在 X 射线采集图像的过程中，X 射线会随机产生大量的光子和电子，而这些光子和电子都具有量子特性，所以变现的噪声为量子噪声。

##### 2. 电子噪声

电子噪声是由于像增强器随机起伏的光电子流所产生的噪声，它在图像上表现为粒子蠕动的特征。

##### 3. 粒子噪声

离子噪声也是由像增强器所产生的，好像雪花一样存在图像上，明显的降低图像质量。

##### 4. 量化噪声

量化噪声是噪声的主要来源，它可以明显降低图像的质量，对于此类噪声我们可以采取优化措施进行处理。

##### 5. 加性噪声和乘性噪声

加性噪声和乘性噪声是由于图像传输过程中以及电视扫描光栅所引起的噪声，前者与

图像信号不相关，后者则相关。

### 6. 颗粒噪声

颗粒噪声是像增强器的非均匀性的荧光屏输出的光呈颗粒状分布。当荧光屏受到电子激发时，其输出的光呈现颗粒状闪烁，会造成成像管输出噪声。

### 7. CCD 噪声

CCD 暗噪声则包括由均匀分布的入射光子和光所产生的电荷数引起的暗噪声、半导体均匀耗尽层随机激发引起的暗噪声、器件空间位置缺陷引起的暗噪声以及 CCD 中由于电荷转移等引起的暗噪声<sup>[14]</sup>。

## 3.2 现有的图像处理算法研究

前面对 X 光图像的特征进行了分析。根据分析可知，对 X 光图像进行图像处理的目的是提高图像的清晰度，主要手段是减少图像中的噪声，并突出图像的边缘。考虑到 X 光图像中噪声的多样性及复杂性，靠单一的图像去噪算法处理图像效果可能会非常差，因此必须采用复合型的图像去噪算法。另外，关于如何解决图像的边缘问题，目前采用的主要方法有图像增强算法和图像分割算法。现有安检图像的图像处理算法就是将三方面中每个方面单独采用的算法组合起来，这个组合作为整个安检系统图像处理模块的图像处理算法。下面就对各种算法进行探讨。

### 3.2.1 图像去噪算法

图像去噪算法是图像处理领域研究最为广泛的算法，图像去噪常用的算法主要有中值滤波、均值滤波、小波软硬阈值等算法。但鉴于 X 光图像的特征，噪声较多且较复杂，因此采用单一的去噪方法往往得不到满意效果，必须采用复合的去噪算法进行综合去噪。在实际应用中，一般采用小波去噪与空域滤波相结合的方法对图像进行去噪处理。常见的组合形式主要有小波变换与中值滤波结合，先对图像进行小波变换，再进行中值滤波；还有先对图像进行小波阈值去噪，然后再对两个不同阈值部分进行自适应处理；以及先对图像进行均值滤波处理，然后再进行基于固定背景的阈值差影处理，最后再进行中值滤波处理等<sup>[16]</sup>。

从噪声来源来分，图像噪声大体上可以分为固定噪声和随机噪声两种。其中固定噪声是每幅图像中都存在的噪声，随机噪声是图像采集中随机产生的噪声，是我们研究的重点。对于固定噪声，因为每幅图像中都存在，可以采用 X 射线未穿透物体时的图像和 X 光采集图像进行相减的方式进行去噪。假设图像信息可以表示如下：

$$f(x, y) = S(x, y) + N_1(x, y) + N_2(x, y) \quad (6)$$

$$f_1(x, y) = N_1(x, y) \quad (7)$$

其中  $f(x, y)$  为 X 光采集到的图像， $f_1(x, y)$  为 X 射线未穿透物体时的图像， $S(x, y)$  为



无噪声图像,  $N_1(x, y)$  为随机噪声,  $N_2(x, y)$  为固定噪声<sup>[18]</sup>。以上两式相减即可达到去除固定噪声的目的, 得到的是只含有随机噪声的图像。

根据图像去噪方式的不同, 图像去噪算法可分为空域和频域两大类算法<sup>[19]</sup>。空域去噪方法是指对图像中每个像素的灰度值进行统一的数据运算处理, 处理过程简单快速, 常见的空域去噪算法主要有均值滤波、中值滤波等。频域去噪方法则是先将图像变换为频域内之后对变换后的图像系数进行一系列处理, 然后再对处理完的图像进行反变换运算得到最终处理图像<sup>[20]</sup>。这类方法稍微复杂, 频域去噪算法主要有傅里叶变换、小波去噪等。下面就一些有代表性的去噪算法<sup>[21]</sup>进行分析。

### 3.2.1.1 均值滤波

均值滤波是通过对图像空间中邻域操作来完成的, 是一种最简单的空间滤波算法。所谓均值是指一个邻域内的平均灰度值是通过这个邻域内所有像素和除以像素的个数得到的。假设  $f(x, y)$  是要处理的图像, 图像像素矩阵大小为  $N \times N$ , 那么经过均值滤波处理以后的图像  $g(x, y)$  可以表示为:

$$g(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{(i, j) \in S} f(i, j) \quad (8)$$

其中  $x, y = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ,  $S$  表示以  $(x, y)$  为中心点的邻域像素集合,  $M$  表示  $S$  内所有像素个数的数目<sup>[22]</sup>。

均值滤波效果与所选择的邻域半径成反比, 邻域半径越小, 处理后的图像就越清晰。虽然均值滤波去噪算法能够简单快速地去掉图像噪声, 但却是以牺牲部分图像细节为代价, 在降噪的同时也使得图像损失了一定程度的清晰度<sup>[23]</sup>。因此, 考虑到 X 光图像噪声的复杂性, 单纯使用均值滤波去噪算法是无法提高图像清晰度的。

### 3.2.1.2 中值滤波

与均值滤波类似, 中值滤波也是通过对图像空间中的邻域操作实现去噪目的的, 是一种非线性滤波方法。与均值滤波不同, 中值滤波不需要事先取得图像相关的统计信息, 应用非常方便和简单。其基本思想是取某个像素邻域集合中的中间的灰度值作为这个邻域集合所有像素的灰度值。

假设一维信号序列为  $\{f_i\}, i = 1, 2, \dots, N$ , 根据中值滤波原理, 可以得到滤波后的信号输出为:

$$g_i = \text{medi}[a_{n_f}, f_{-j}, f, \dots, f, f_{+j}] \quad (9)$$

其中 median 表示取中值,  $1 < j-r < j+r < N$ , 所谓中值是指对信号序列按数值大小依次排序之后取中间位置的值。

对于二维信号序列  $\{X_{ij}\}$ , 如果采用中值滤波, 则要求滤波窗口也是二维的, 因此二维数据的中值滤波可以表示为:

$$Y_{i,j} = \text{Median}_A \{X_{ij}\}, A \text{ 为滤波窗} \quad (10)$$

从式 (10) 可知, 滤波窗口是中值滤波的核心。采用中值滤波时, 要根据不同类型的物体采用大小不同的滤波窗口, 也就是说窗口的尺寸是可以改变的, 常见的滤波窗口有  $3 \times 3$ 、 $5 \times 5$  等。不同形状的滤波窗口适合的物体形状也不同, 比如方形的滤波窗口适合处理边缘比较长的物体, 而十字形的滤波窗口则比较适合处理棱角比较突出的物体。在实际的应用过程中, 要根据处理效果随意选择窗口尺寸和形状。

与均值滤波去噪算法相比, 中值滤波去噪算法不仅能够去除图像中的噪声, 而且还能解决均值滤波算法由于细节丢失所带来的图像模糊问题, 在去除噪声的同时能很好地保持图像的细节部分。另外, 由于中值滤波算法对于去除椒盐噪声等孤立噪声效果比较好, 所以对去除安检图像采集过程中产生的脉冲干扰以及扫描等噪声非常有效。中值滤波算法也存在一定的不足, 比如在处理那些细节部分比较多的图像以及高斯噪声时效果不是特别明显。总的来说, 与均值滤波算法相比较, 中值滤波算法的优势还是比较明显的<sup>[24]</sup>。

### 3.2.1.3 小波去噪

随着科学技术和研究水平的不断发展和提高, 小波分析技术的应用领域越来越广泛。特别是在数字图像处理领域, 越来越多的科研人员利用小波分析技术实现去除噪声的目的, 并且在目前研究阶段也取得了相当好的进展和效果。

鉴于小波理论具有非常好的时频特性和多分辨率特性, 小波理论在去除图像噪声方面具有先天的优势。目前, 有关小波分析技术的图像去噪算法有很多种, 根据使用方式的不同可以分为三类: 通过求空域相关值进行去噪的算法、通过求出模极大值进行去噪的算法和通过设定阈值进行去噪的算法<sup>[25]</sup>。其中阈值去噪算法是目前大部分研究人员都重点使用的小波去噪算法, 此算法也是三种算法之中最为简单好用的算法。本文重点对这一算法进行研究分析。

基于阈值的小波去噪算法的核心思想是利用图像和噪声经过小波变换以后表现出不同的统计信息来区分图像和噪声。图像频率高的部分经过小波变换以后表现为振幅较大的小波系数, 噪声经过小波变换以后表现为振幅较小的一部分小波系数, 根据这一表现形式的不同, 可以通过设置阈值的方式过滤振幅较小的小波系数达到去除图像噪声的目的。阈值的大小可以根据不同的情况进行设置, 过滤掉小于此阈值的小波系数的图像处理部分, 就可以剔除噪声, 保留原有的图像处理部分, 达到了去除图像噪声的目的<sup>[26]</sup>。

当使用小波阈值去噪算法进行噪声去除时，一般都会简单的认为只要对含有噪声的那些图像高频部分进行一次性处理就行，而忽略了去处理图像的那些低频部分，最终实现的去噪效果肯定也不会很完美，反而同样会造成图像不同程度的存在着一些噪声，所以我们还必须对那些没有处理的图像低频部分进行第二次的小波分解和阈值去噪处理，直到得到的图像与估计的图像相差不大为止。但是并不是对图像进行小波分解和阈值去噪的次数越多就越好，因为随着处理频率的增加，其中小波系数中的噪声能量会变的越来越少，而且会趋于分散状态，这样会大大影响最终的图像去噪效果，实际中大部分的研究人员在使用小波阈值去噪算法时，通常都是采用三层或者四层小波分解的处理方式，往往能取得不错的效果<sup>[27]</sup>。

在基于小波阈值去除噪声的处理过程中，确定阈值函数是一个必不可少的过程，因为去噪过程需要对小波进行分解，那么阈值函数就为小波分解提供了方向。阈值函数有软硬两种之分，每种阈值函数都各有优缺点。软阈值函数处理效果趋于平滑，但是反而会造成图像边缘模糊等图像质量问题。然而硬阈值函数虽然能够很好的保留诸如图像边缘等体现图像部分特性的信息，但是它同时也会造成图像出现伪吉布斯效应等影响视觉的现象<sup>[28]</sup>。所以经过长期的研究发现，有一种被称作半软阈值的阈值函数出现在人们的视野中。

如前所述，确定合适的阈值是小波阈值去噪过程中非常重要的一个环节，如果设定的阈值偏小，那么小波去噪处理之后的图像肯定还会或多或少存在一些噪声，反之如果阈值选定的偏大，图像的一些重要特征则也会一起被滤除掉，反而会引起失真的现象，所以阈值的选定是一个很重要的环节。那么应该如何来确定合适的阈值呢？根据实验经验了解，一般情况下对于给定的小波系数，如果噪声越大，选定的阈值也就大<sup>[29]</sup>。

综上所述，下面对以上三种不同的图像去噪算法进行了简要的归纳总结，主要从各算法的思想和优缺点进行说明，如表 1 所示。

表 1 图像去噪算法对比分析

算法	思想	优缺点
均值滤波	用同一个邻域内所有像素灰度值的平均值代替所有像素的灰度值	算法较简单，适合去除高斯噪声，但会同时损失图像细节部分，造成边缘模糊
中值滤波	用同一个邻域内所有像素灰度值的中值代替所有像素的灰度值	适合去除椒盐噪声，能保护好图像的边界，但同时会损失掉图像中的细线和小块目标区域
小波去噪	先将图像转换到小波域，之后再对小波系数进行处理，最后对图像进行反变换得到处理后的图像。	对于去除任何一种随机噪声不但能取得较好的效果，而且还能保护好图像的细节部分，增强图像的纹理特征，

### 3.2.2 图像恢复算法

在使用 X 射线安检系统对物体进行检测的过程中，被检测的物体一直处于运动状态，而且在检测的过程中，由于系统误差或性能影响会对采集的图像产生大量噪声，使得图像出现模糊、不清晰的现象，影响安检人员对违禁危险品的鉴别和判断。因此，为了提高安检系统检测的准确率，为安检人员提供清晰准确的图像，必须对 X 光采集的图像进行图像恢复处理。图像恢复的原理是在基于图像退化模型的基础上，依据一定的先验数据找到一种合理的算子，对已经发生图像退化的图像进行图像恢复处理，改善图像质量。

既然要对图像进行恢复，那么我们就首先要了解造成图像退化的原因主要有哪些？其次，要建立图像退化模型，最后根据此模型对图像进行滤波处理。图像退化过程可以假设为一个退化函数和一个噪声函数。图 6 给出了图像退化/恢复的一般模型，如图中所示，原始图像  $u(x, y)$  通过退化函数  $H$  后加入噪声  $n(x, y)$ ，产生一幅被退化的图像  $g(x, y)$ 。如果系统  $H$  是一个线性、位置不变性的过程，在空间域中退化图像可以表示为： $g(x, y) = u(x, y) * h(x, y) + n(x, y)$ ，其中  $h(x, y)$  是退化函数  $H$  的空间描述，“\*” 表示空间卷积。在频域中退化图像可描述为： $G(s, t) = U(s, t)H(s, t) + N(s, t)$ 。给定退化图像  $g(x, y)$  和关于退化函数  $H$  的一些知识以及外加噪声  $n(x, y)$ ，进行图像恢复的目的是获得关于原始图像的近似估计  $(x, y)^{[30]}$ 。

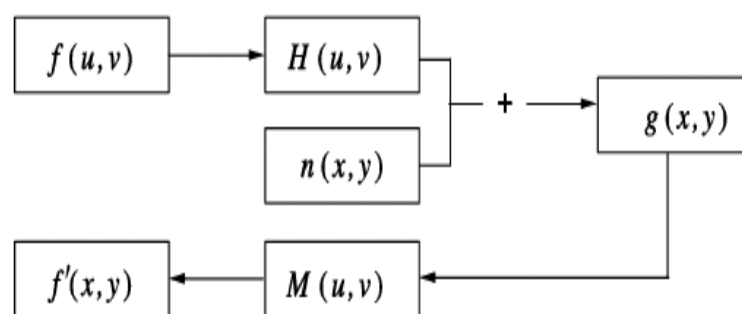


图 6 图像退化/恢复模型

最小二乘滤波法、邻域滤波法、维纳滤波法以及非邻域滤波法是几种常用的图像恢复方法。这些算法都有各自不同的应用场景，但它们的共同点就是进行图像处理之前需要首先获取图像退化模型参数信息，也就是需要先验知识，这对于 X 射线安检系统来说是不适用的。随着图像处理技术的不断发展，一些新的图像处理算法不断涌现，典型的就盲去卷积图像恢复方法，它的数学理论基础是基于最大似然估计(MLE)，也就是用那些受随机噪声所影响的量进行最佳估计。简单地说，关于 MLE 方法的一种解释就是将图像数据看成是随机量，它们与另外一组可能的随机量之间有着某种似然性。其中似然函数用  $g(x, y)$ 、 $f(x, y)$  和  $h(x, y)$  来表示，那么接下来的重点就是找到似然函数。在盲去卷积中，最优化问题用规定的约束条件并假定收敛时通过迭代来求解，得到的最大  $f(x, y)$  和  $h(x, y)$  就是还原的图像和 PSF<sup>[32]</sup>。

盲去卷积图像恢复算法不需要首先获取退化模型参数信息，只需对退化参数进行估计

就可进行图像恢复。其优点是既对图像进行恢复，也同时对点扩张函数进行恢复<sup>[31]</sup>。盲去卷积图像恢复算法在事先对退化图像没有一点先验知识的条件下，一样可以对失真的图像进行图像恢复处理，故而该方法越来越受到人们的重视。

### 3.2.3 图像增强算法

图像增强是一种常用的既简单又重要的图像处理方法，现有的图像增强算法一般是首先进行一阶微分算子法或者二阶微分算子法锐化处理，然后再进行直方图均衡化的对比度增强处理或者是双边滤波器处理。

图像增强主要是对图像的对比度进行增强，目前常用的图像增强算法也是对比度增强算法，这种算法的核心思想就是根据一定的规则来修改处理图像中每一个像素的灰度值，从而达到改变处理图像整个灰度动态范围的目的。改变图像灰度动态范围既可以压缩也可以扩展，甚至是分段处理图像的灰度，主要是根据图像的特征以及处理要求在不同的区间分别进行扩展和压缩<sup>[33]</sup>。

### 3.2.4 图像锐化算法

经过图像去噪算法的处理，虽然减少了图像中的噪声，但同时由于图像经过了平均或者积分运算，会使得图像出现边缘模糊不清晰的问题，因此，为了尽量减少这一负面问题的影响，同时也为了突出物体的边缘，以更好地区分不同的物体和发现隐蔽的物体，还必须对经过去噪处理的图像进行锐化处理。图像锐化处理的目的是为了突出图像的某些细节部分或者增强被模糊的细节，使得图像从整体上来看更加清晰。图像锐化处理本质上是对图像进行逆运算（如微分运算），达到清晰突出图像边缘的目的<sup>[34]</sup>。

如上所示，常用的图像锐化方法主要有一阶微分算子法和二阶微分算子法。一阶微分算子法主要包括 Robert 算子法、Prewitt 算子法和 Sobel 算子法。典型的二阶微分算子法主要是拉普拉斯二阶微分算子法。在图像锐化处理中，一阶导数主要是通过梯度来实现，所以使用一阶导数来检测边缘点的算法又叫做梯度算子法。梯度值与像素差值成正比。通常在一幅图像中，梯度值较大的区域是突出的边缘区域，梯度值较少的区域都比较平滑，当然也有梯度为零的地方，就是那些灰度值为常数的区域。下面将对这四种算子法一一进行详细的分析。

#### 3.2.4.1 Robert 微分算子法

Robert 一阶微分算子法是一种梯度算子法，其利用交叉的差分表示梯度，是一种利用局部差分算子寻找边缘算子的算法，其核心是利用两个相互对着的像素进行相减。Robert 一阶微分算子法的公式如下式所示：

$$G(i, j) = |f(i, j) - f(i+1, j+1)| + |f(i+1, j) - f(i, j+1)| \quad (11)$$

Robert算子法包含两种模板，分别为：

$$G_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad G_y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

标注 • 代表像素当前所处的位置。通过梯度算子检测边缘的方法有点类似于高通滤波的方法，主要就是通过增强高频分量，抑制低频分量来达到边缘检测的目的<sup>[35]</sup>。

虽然 Robert 算子法计算起来十分简便，仅需对 4 个像素进行差分运算即可得到结果，但它易受噪声的影响，因此，一般应用在对不含噪声图像边缘检测的情况下。而在对 X 光图像进行处理的过程中，我们希望边缘检测算法能够对于噪声具有一定的抑制作用，所以 Rober 算子对于 X 光图像处理来说是不合适的。

#### 3.2.4.2 Prewitt 微分算子法

如前面章节中所述，对图像进行均值处理能够达到去除噪声的目的。Prewitt 算子法正是利用这一点，首先对图像像素进行均值处理，然后利用像素之间的差分运算得到最终图像锐化的结果。Prewitt 算子法的模板主要有水平和垂直两种，分别是：

$$d_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad d_y = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

#### 3.2.4.3 Sobel 微分算子法

Sobel 微分算子法是典型的基于一阶导数的边缘检测算子法，由于该算子中引入了类似局部平均的运算，对噪声具有平滑作用，能很好地消除噪声的影响。Sobel 微分算子法经常被应用于突出图像边缘的技术当中，经过它处理之后的图像边缘宽度大于二像素，是一个标准量而不是向量。它具有各向同性的性质，即处理结果与图像的突变方向无关。

实际使用中，Sobel 算子法的检测模板分别如下：

$$D_x = \begin{bmatrix} -1 & -2 \\ 0 & 0 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad D_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -2 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Sobel算子法本质上是对Prewitt算子法的改进，它采用加权平均的方法，在图像锐化的同时达到了去除噪声的目的。Prewitt算子法采用均值的方法在去噪的同时也会对图像边缘造成一定程度的模糊，Sobel算子法通过在模板中增加一个加权作用，很好的解决上面遇到的问题<sup>[36]</sup>。

#### 3.2.4.4 拉普拉斯微分算子法

在介绍拉普拉斯微分算子法之前，我们首先了解一下什么是拉普拉斯变换，假设二维

图像用  $f(x, y)$  表示，其拉普拉斯变换可以表示为：

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (12)$$

对于离散函数  $f(i, j)$ ，拉氏算子定义为

$$\nabla^2 f(i, j) = \nabla_x^2 f(i, j) + \nabla_y^2 f(i, j) \quad (13)$$

其中

$$\begin{aligned} \nabla_x^2 f(i, j) &= \nabla_x[\nabla_x f(i, j)] \\ &= \nabla_x[f(i+1, j) - f(i-1, j)] \\ &= \nabla_x f(i+1, j) - \nabla_x f(i-1, j) \\ &= f(i+1, j) - f(i, j) - f(i, j) + f(i-1, j) \\ &= f(i+1, j) + f(i-1, j) - 2f(i, j) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\nabla_y f(i, j) = f(i, j) - f(i, j-1)$$

同样有

$$\nabla_y^2 f(i, j) = f(i, j+1) + f(i, j-1) - 2f(i, j) \quad (15)$$

因此可得到：

$$\nabla^2 f(i, j) = f(i+1, j) + f(i-1, j) + f(i, j+1) + f(i, j-1) - 4f(i, j) \quad (16)$$

写成模板系数形式即为拉普拉斯算子：

$$H_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

除此之外模板还有

$$H_0 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad H_0 = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 4 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

拉普拉斯二阶微分算子法同样具有各向同性的性质，但是和 Robert 微分算子法一样比较容易受噪声的影响，所以，一般要先对图像进行去噪处理，然后再对图像进行锐化处理的效果会更好。

以上对各个微分算子法的主要思想和应用领域进行详细的阐述和分析，下面从原理和

优缺点两个方面对四种微分算子法进行归纳总结，对比各个算子法的优缺点，如表 2 所示。

表 2 图像锐化算法对比分析

锐化算法	原理	优缺点
Robert 微分算子法	直接对模板中的 4 个像素进行差分运算	算法十分简便对噪声比较敏感，只适用于无噪声图像的边缘检测
Prewitt 微分算子法	首先对像素进行均值处理，然后再对像素进行差分运算	在增强图像边缘的同时会产生一定程度的模糊
Sobel 微分算子法	在 Prewitt 算法的模板基础上加了一个加权作用	能很好的同时抑制噪声和突出图像边缘
拉普拉斯微分算子法	对图像像素直接进行求二阶偏导微分运算	对噪声敏感，整体锐化效果不如梯度算子好

### 3.2.5 图像分割算法

图像分割技术是数字图像处理中非常重要的一种技术，图像分割的目的是找出图像中有价值的图像特征，针对 X 光安检图像，采用图像分割技术可以获得以下好处：一是对安检包裹中种类繁多的物体依据不同的材质类别进行分离；二是对物体进行独立分割，便于安检人员进行观察辨别；三是消除安检图像中物体存在的遮挡现象，显示被遮挡物体的实际形状。目前，研究人员提出了许多种图像分割算法，不同的图像分割算法应用的场景不同，其中一部分方法可以直接应用于处理任何一种图像，另一部分则只能应用于特定的图像，对于不同环境或条件下的图像采用的图像分割算法也是不同的。

图像质量的好坏直接影响图像的分析和辨别，采用图像分割技术是提高图像质量的一个重要步骤，图像分割的好坏一般要根据具体的环境要求进行衡量。在现有的图像分割处理算法中，采用的方法主要包括基于阈值的图像分割算法、基于区域生长的图像分割算法、利用神经网络进行图像分割的算法等，在进行图像分割处理之后还需再进行形态学处理，完善图像分割效果<sup>[17]</sup>。根据图像分割方式的不同，可以将图像分割算法分为四类：通过检测图像边缘进行图像分割的算法、设定若干个阈值进行图像分割的算法、使用特定理论工具进行图像分割的算法以及利用区域生长进行图像分割的算法<sup>[37]</sup>。

#### 3.2.5.1 基于阈值的图像分割

基于阈值的图像分割算法是目前图像分割技术中应用最广泛也是历史最悠久的一种基本算法，算法的版本非常多。其核心的思想是根据图像的灰度范围信息确定若干个合适的阈值门限，根据阈值门限对图像中的每个像素的灰度值进行分类，通过将图像像素分为不同的类型，就可以将图像分为若干个不同的区域，实现图像的分割。



在使用基于阈值的图像分割算法在对图像进行分割前，首先要初步估计图像分割的目标，大概知道图像分割的要提取的目标是什么类型，图像分割成几大块区域等。一般情况下，处于相同背景范围内的相邻图像像素之间的灰度值或选取的图像特征信息之间的灰度值应该接近，如果相差较大，则应该区分开来。图像分割目标的初步估计可以采用以下这种思路。

假设处理前的图像用  $f(x, y)$  表示，采用基于阈值图像分割算法处理图像前首先要确定阈值门限  $T$ ，从而根据该阈值门限值将处理图像分为两大块区域，处理完的图像为

$$g(x, y) = \begin{cases} b_0 & f(x, y) < T \\ b_1 & f(x, y) \geq T \end{cases} \quad (17)$$

如果出现选取多个阈值的情况，那么处理完的图像则应该有多个不同的区域和目标数，它们分别对应不同的灰度值范围<sup>[38]</sup>。

不管基于阈值图像分割算法采用的是单个阈值还是多个阈值，阈值的选定一定要非常合理，从而区分图像中任意的一个像素点是否属于提取目标还是背景区域，为后面生成相应的二值化图像奠定了基础。

### 3.2.5.2 最大方差自动取阈值法

不同图像的灰度值范围不同，所以它们各自的灰度直方图表现出来也是各种各样，特别是峰值与峰谷的不一样，甚至有的时候会遇到两个区域的面积也不能测定的问题，如果此时使用最大方差自动取阈值法一般都能很好的解决这个问题，最终实现区分两个区域。

假设一幅图像灰度值的集合为  $S = (1, 2, 3, \dots, i, \dots, L)$ ，图像所有的像素的个数为

$$N = n_1 + n_2 + \dots + n_L = \sum_{i \in S} n_i \quad (18)$$

其中灰度值为  $i$  的像素的个数为  $n_i$ ，标准化之后的像素个数为

$$P = n_i / N \quad (19)$$

其中

$$i \in S, P_i \geq 0, \sum_{i \in S} P_i = 1 \quad (20)$$

假设一幅图像的灰度阈值是  $t$ ，由它分离的两个区域的面积比和平均灰度值如下：  
区域 A 的面积比：

$$\theta_1 = \sum_{j=0}^t \frac{n_j}{n} \quad (21)$$

区域 B 的面积比:

$$\theta_2 = \sum_{j=t+1}^{G-1} \frac{n_j}{n} \quad (22)$$

整幅图像平均灰度值:

$$u = \sum_{j=0}^{G-1} (f_j \times \frac{n_j}{n}) \quad (23)$$

区域 A 的平均灰度值:

$$u_1 = \frac{1}{\theta} \sum_{j=0}^t (f_j \times \frac{n_j}{n}) \quad (24)$$

区域 B 的平均灰度值:

$$u_2 = \frac{1}{\theta} \sum_{j=t+1}^{G-1} f_j \times \frac{n_j}{n} \quad (25)$$

式中,  $G$  为图像的灰度值的个数。

整幅图像的平均灰度值与区域 A、区域 B 平均灰度值可以得到此式

$$u = u_1 \theta_1 + u_2 \theta_2 \quad (26)$$

在一个区域内像素的灰度值一定都是类似的, 反之不同区域内的像素灰度值不一样, 如果区域 A 与区域 B 之间的灰度值相差比较大的话, 那么这两个区域的平均灰度值与整幅图像的平均灰度值相差肯定也很大, 区域 A 与区域 B 的方差可以表示为:

$$\sigma_B^2 = \theta_1(u_1 - u)^2 + \theta_2(u_2 - u)^2 \quad (27)$$

上式中  $\sigma_B^2$  指的就是两个区域之间的方差, 方差与  $t$  值有关, 所以上式可改写为

$$\sigma_B^2 = \theta_1(t)(u_1 - u)^2 + \theta_2(t)(u_2 - u)^2 \quad (28)$$

上式经数学推导可以写为:

$$\sigma_B^2 = \theta_1(t) \times \theta_2(t) (u_1(t) - u_2(t))^2 \quad (29)$$

当两个区域之间的方差达到最大值时, 此时可以确定最佳阈值  $T$  为

$$T = \max[\sigma_B^2(t)] \quad (30)$$

最大方差自动取阈值方法是不需要事先人为的设定其它参数, 阈值完全是自动选取的, 它不但可以用于两个区域之间的阈值选取, 而且还可以用于多个区域之间的多个阈值的选取。经过一系列的实验证明该方法能够很好的实现图像二值化, 尤其对背景与目标灰度值相差比较大的图像更有效<sup>[39]</sup>。

### 3.2.5.3 基于区域生长的图像分割

基于区域生长的图像分割算法基本思路是把具有相似性质的一堆像素统一归纳起来构成不同的区域。既然要把具有相似性质的一堆像素统一归纳起来，那么就需要在分割区域选择一个种子像素作为生长的起点，按照预先定义的生长准则把种子像素邻域中与种子像素具有相同或者类似属性的像素集合到种子像素所处区域之中<sup>[40]</sup>。以此类推，后面继续找出新的像素种子，作为生长起点集合周围类似属性的像素或者子区域，这样一个较大的区域就产生了。

在基于区域生长的图像分割算法中，预先定义生长准则是算法的重点，仅依赖于我们所要考虑的问题，而且它同样受图像数据种类的影响，彩色图像、单色图像（如灰度图像）分别对应的生长准则是不同的。例如，利用人造卫星图像进行陆地分析时颜色能够严重影响分析结果。通常种子像素在生长的过程中直到没有符合生长准则的像素就不继续合并了。每一个生长准则都只适用于某一个特定种子，不会影响整个生长过程。如果我们想提高区域生长的能力，就必须增加大小概念的附加准则，即定义生长准则时考虑一下与图像和目标全局性质相关的问题，比如候选像素与生长区域平均灰度值的比较、图像形状或者尺寸大小等<sup>[41]</sup>。若在区域生长过程中未使用连通性信息，就会产生无意义的分割结果。

基于区域生长的图像分割算法一般分为三步：选取种子、制定生长准则以及停止生长的准则。其中关键步骤就是定义生长准则，生长准则直接影响图像分割的整个过程，虽然大部分的生长准则都能制定的很合适，但是我们有时还必须根据不同图像的局部性质来定义不同的生长准则。一般定义生长准则的方法有两种，一种是基于区域灰度差的方法，另外一种是基于区域内灰度分布统计性质的方法<sup>[42]</sup>。本文将重点研究的是前者。

### 3.2.6 形态学处理

在完成了以上的图像处理步骤以后，最后还需要对图像进行形态学处理。图像的形态学处理是数字图像处理技术中一个重要的步骤，形态学处理的目的是为了提取能够表现和描绘图像不同分量的区域，比如图像的边界、骨架以及凸壳，同时它也可以被用来对图像预处理或者后处理中的过滤，修剪和细化图像分量<sup>[43]</sup>。形态学处理基础主要包括膨胀和腐蚀两种操作，它们是一切形态学处理算法的基础<sup>[44]</sup>。膨胀的基本原理是用一个结构元素与图像中对应的像素进行“或”运算，腐蚀的基本原理是用一个结构元素与图像中对应的像素进行“与”运算。

形态学处理中的开运算过程是指先对图像进行腐蚀然后再膨胀，一般可以使得图像的边界变的平滑，消除图像中细小的噪声之类的杂点。而闭运算过程正好与开运算过程相反，它是先对图像进行膨胀然后再腐蚀，一般可以填补图像中狭小的间断和弥补细长的缺口。

### 3.3 本章小结

本章主要对 X 光图像的特征和现有的图像处理算法进行了详细阐述,首先分析了 X 光图像的特征和影响 X 光图像质量和噪声的因素;其次从图像去噪算法、图像恢复算法、图像增强算法、图像锐化算法、图像分割算法以及图像形态学处理算法等几大类算法的角度对现有的图像处理算法进行分析总结,并指出了各自的特点和优缺点,为下一步研究奠定了基础。

## 第四章 基于 Matlab 的 X 光安检图像处理研究及实现

### 4.1 引言

X 射线安检系统包括硬件和软件两部分，硬件平台是实现图像处理的基础，运行于硬件平台之上的软件程序才是图像处理的关键，要达到理论的图像处理效果，就必须将图像处理算法在硬件平台之上运行，这样才能发挥出整体系统的优势。X 射线安检系统的硬件包含两大部分，一部分是 X 射线采集硬件，这部分内容不是本文研究的重点；另一部分是图像处理硬件，本文重点对图像处理系统进行了研究。本章首先分析了图像处理系统的工程实现现状，指出了 FPGA 实现图像处理的优点，并基于 FPGA 设计了图像处理系统的方案；然后基于 Matlab 对该图像处理系统进行了仿真实验，并实验对比了各种图像处理算法的优劣，得出了适用于物流系统 X 光安检图像的算法流程。

### 4.2 系统方案设计

本节首先对目前图像处理系统的研究现状进行了分析总结，指出了系统设计的方向，然后，基于 FPGA 设计了一种图像处理系统方案。

#### 4.2.1 图像处理系统的研究现状

由于 DSP 具有较高的时钟频率和专用的乘加计算模块等资源，非常适合数字信号处理系统的需求，因此传统的图像处理系统大多基于 DSP 处理器或专用的芯片实现。一般应用 DSP 进行图像处理的机制如图 7 所示。程序计数器及控制模块负责控制程序流程，程序以指令的形式存储在程序存储器中，存储器用于存储当前并不使用但必须保持的数据，算术逻辑单元中包含一种或多种固定结构的算数单元，支持多种功能的算数单元，但同时仅有一个动作，I/O 接口负责与外界的通讯以及和其他处理器的连接。

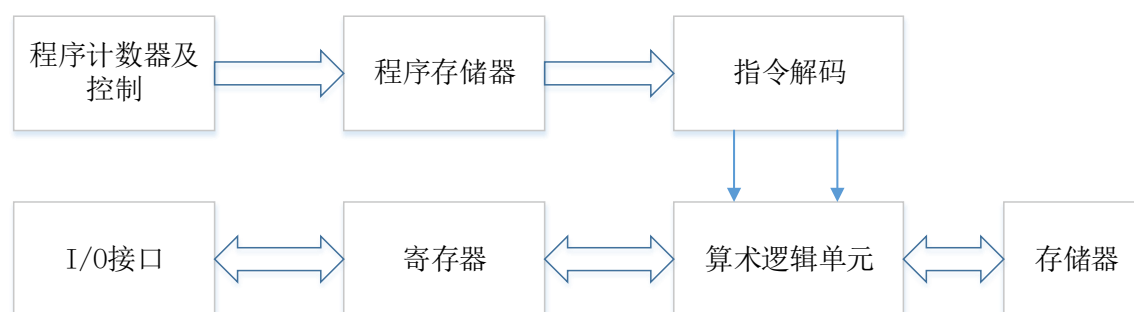


图 7 DSP 图像处理机制

作为专用的数字信号处理芯片，DSP 能够很好地完成图像信号处理任务。但从 DSP 的实现机制可以看出，DSP 指令是顺序执行的，而且是固定数据位宽，这就造成 DSP 内部资源的利用效率不高，使得数据吞吐量受限，而且还需要较大的存储空间。特别是当 DSP 的系统频率与要处理的信号频率较接近时，处理性能较差。

随着可编程技术的不断发展，以FPGA为代表的可编程芯片逐渐成为数字信号处理的核心器件，广泛应用于网络、数字通信、图像和视频等领域。FPGA的处理功能包含查表、多路复用器、寄存器、分布式块存储以及各种专用的加法器、乘法器和输入输出设备。丰富的处理功能、超强的处理能力以及优越的可编程性使得FPGA成为高性能数字信号处理的理想器件，在快速傅里叶变换、数字滤波等方面具有较强的优势。特别是FPGA的并行处理能力，使得数字信号处理的效率大幅提升。在强调可编程的今天，FPGA高效灵活的特性使得开发人员可以设计出有针对性的硬件结构用来处理图像信号，可以根据系统需求灵活调整实现结构，实现系统的最优化。

#### 4.2.2 基于FPGA的图像处理系统方案设计

鉴于FPGA在实现图像信号处理方面优势，本节采用FPGA来实现图像处理算法，并基于FPGA设计了一种图像处理系统。如图8所示，系统方案主要有FPGA、DSP、CPLD、SRAM等几个核心器件组成。

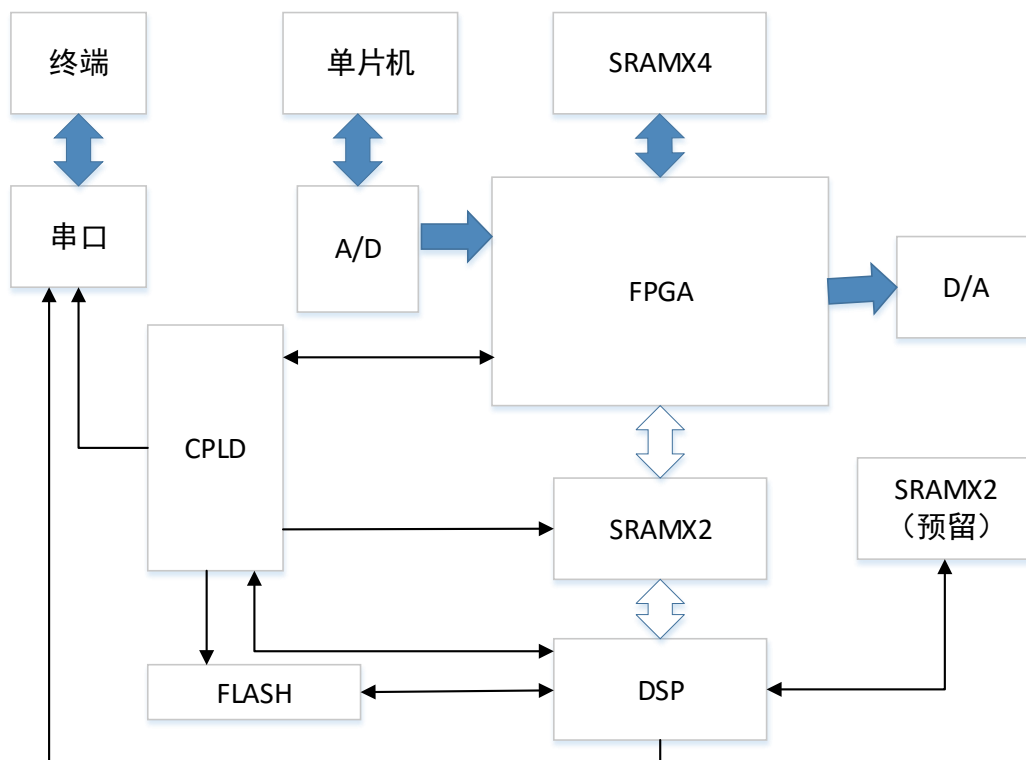


图8 基于FPGA的图像处理系统方案

如图8所示，在基于FPGA的图像处理系统方案中，A/D和D/A模块主要负责信号的数字化转换工作；FPGA芯片主要负责实现具体的图像处理算法，DSP芯片主要实现图像处理流程的控制工作，FLASH和SRAM负责存储图像。

基于FPGA的图像处理系统在正式处理图像之前，首先要采集一副没有被检物体的纯背景图像，通过FPGA将采集的背景图像传输给DSP，由DSP控制程序将图像存储到FLASH芯片中进行保存，供以后使用。系统上电以后，由DSP负责将存储于FLASH的初始化程序

加载到DSP芯片中，完成系统的初始化；系统初始化完成以后，解码器将输入的视频信号转换为数字信号和控制信号，并送入到FPGA中，FPGA以连续4帧形式将图像存放到4片SRAM中，根据像素时钟，FPGA在前半周期存一帧，后半周期对四片SRAM中存储的连续四帧图像进行平均运算；这时DSP需FLASH中存储的背景图像信息传输到SRAM中，然后FPGA再读取此背景图像，与四帧平均图像进行相减实现背景差影，最后采用极值中值滤波对图像进行处理，得到最终图像，经过D/A转换以后输出到显示器上。

在基于FPGA的图像处理系统方案中，图像处理算法如图像去噪算法、图像恢复算法、图像增强算法、图像锐化算法、图像分割算法以及形态学处理都是在FPGA及相关器件中完成的。FPGA主要实现的功能有以下几项：

(1) 图像恢复。采用X射线安检系统对物体进行检测时，物体一直处于运动过程中，而且由于噪声的影响，采集到的图像可能会出现模糊和不清晰的现象，因此必须对图像采取恢复处理。图像恢复的原理是在基于图像退化模型的基础上，依据一定的先验数据找到一种合理的算子，对已经发生图像退化的图像进行图像恢复处理，改善图像质量。

(2) 图像去噪。X射线采集的图像存在多种不同类型的噪声，单一的去噪方法往往得不到满意的去噪效果，必须采用复合的去噪算法进行综合去噪。

(3) 图像增强。图像增强是一种常用的既简单又重要的图像处理方法，主要的方式是对图像中有用的细节进行增强，而对图像识别不利的信息进行抑制，为后续的图像处理奠定基础。

(4) 图像锐化。图像锐化处理的目的是为了突出图像的某些细节部分或者增强被模糊的细节，使得图像从整体上来看更加清晰。图像锐化处理本质上是对图像进行逆运算（如微分运算），达到清晰突出图像边缘的目的。常用的图像锐化方法主要有Robert算子法、Prewitt算子法、Sobel算子法以及拉普拉斯二阶微分算子法。

(5) 图像分割。图像分割包括区域分割和边界分割，区域分割是指将图像分割为不同特性的区域，边界分割是将不同物体的图像分割开来。图像分割算法主要有边界跟踪、阈值分割、区域增长以及基于不同算子的边缘检测方法。

(6) 形态学处理。图像的形态学处理是数字图像处理技术中一个重要的步骤，其目的是为了提取能够表现和描绘图像不同分量的区域，比如图像的边界、骨架以及凸壳，同时它也可以被用来对图像预处理或者后处理中的过滤，修剪和细化图像分量。

### 4.3 X 光图像处理系统功能实现及仿真

#### 4.3.1 仿真工具及方法

为了对比各种图像处理算法的优劣，必须选择合适的仿真工具对图像处理算法进行仿真。MATLAB作为一种高性能的数值计算和可视化软件，在矩阵运算、数值分析、信号处



理和图形显示方面具有较强的优势。另外，MATLAB编程语言简单直观，开放性強，界面非常友好，在科学工程计算中应用非常广泛。

在数字图像处理中，图像通常用矩阵形式表示，众所周知，矩阵运算是MATLAB的基础，因此，采用MATLAB进行图像处理再合适不过了。MATLAB中集成了大量功能强大的图像处理工具箱，如小波工具箱/图像处理工具箱以及数字信号处理工具箱，借助这些工具箱可以很方面地对图像性质进行深入研究。在图像处理工具箱中，从图像增强方法到图像分割方法，几乎包含了图像处理的所有方法，通过简单的函数调用就可以实现许多经典的图像处理算法。因此，基于MATLAB研究图像处理算法非常方便。

本系统的设计方案采用基于FPGA的图像处理实现，由于传统数字信号处理系统大多采用DSP处理器实现，DSP开发人员大多对FPGA及硬件设计不是特别熟悉，因此，必须首先采用MATLAB对系统进行仿真实验。System Generator for DSP是XILINX公司开发的基于MATLAB的数字信号处理工具，是专门针对FPGA信号处理开发的建模和设计工具，开发人员可以使用该工具对基于FPGA设计的信号处理系统进行建模和仿真，并可以自动将仿真系统映射为基于FPGA的硬件设计方案。

作为一种系统创建和仿真的可视化环境，MATLAB/Simulink及System Generator工具箱为图像处理系统的设计和实现构建了一个很好的系统仿真和验证平台，因此，论文设计的图像处理系统功能都将在MATLAB中进行仿真实现。

#### 4.3.2 图像去噪算法仿真

本节主要对均值滤波、中值滤波和小波阈值去噪这三种常用的图像去噪算法进行了仿真，并对比了几种算法的仿真结果，从中选出适合物流系统 X 光安检图像的去噪算法。本节中用于实验分析的原始图像如图 9 所示。



图 9 原始图像

首先对均值滤波方法进行了仿真，均值滤波是通过对图像空间中邻域操作来完成的，



是一种最简单的空间滤波算法。所谓均值是指一个邻域内的平均灰度值是通过这个邻域内所有像素和除以像素的个数得到的。均值滤波算法的流程图如图 10 所示，算法的核心步骤是用窗口内所有像素的均值代替窗口中心的像素值。

均值滤波仿真采用的是 $3 \times 3$ 模板，对原始图像处理后的图像如图 11 所示，可以看出图像中噪声还是存在很多，只是去除了少量的噪声，而且同时造成图像边缘明显的模糊现象，去噪效果不理想。这说明均值滤波算法对物流系统 X 光安检图像的去噪效果较差，不能满足物流系统安检图像处理的需求。

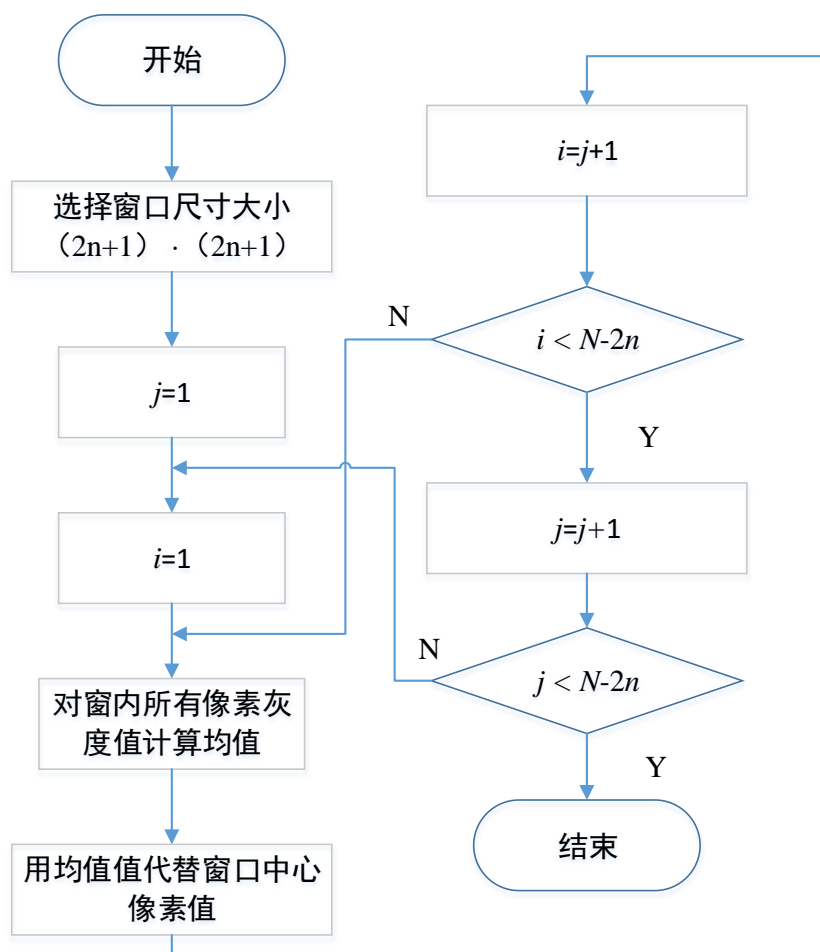


图 10 均值滤波算法流程图

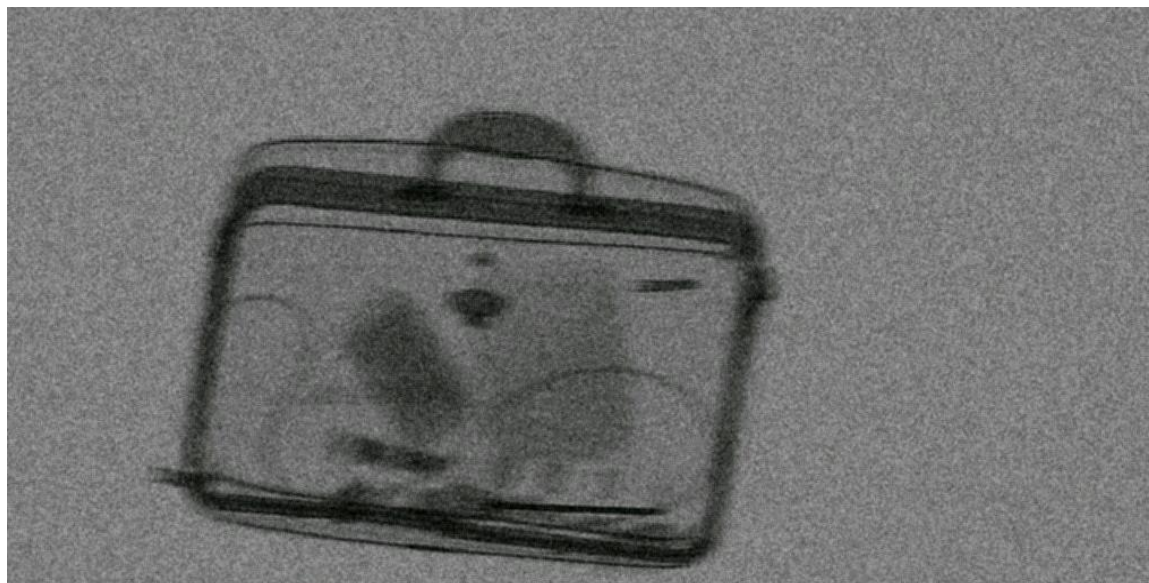


图 11 均值滤波处理后的图像

与均值滤波类似，中值滤波也是通过对图像空间中的邻域操作实现去噪目的，是一种非线性滤波方法。与均值滤波不同，中值滤波不需要事先取得图像相关的统计信息，应用非常方便和简单。其基本思想是取某个像素邻域集合中的中间的灰度值作为这个邻域集合所有像素的灰度值。中值滤波算法的流程图如图 12 所示，算法的核心步骤是用窗口内所有像素的中值代替窗口中心的像素值。

中值滤波方法的仿真同样采用 $3\times 3$ 模板，原始图像如图 8 所示，中值滤波方法对原始图像处理后的图像如图 13 所示，虽然去噪效果比均值滤波方法要好，物体边缘也稍微相对清晰，但是还是明显可以看出存在很多噪声，图像的整体去噪效果也不是很理想。这是因为物流系统 X 光图像中存在多种类型的噪声，用单一的去噪算法处理不能完全去除噪声。

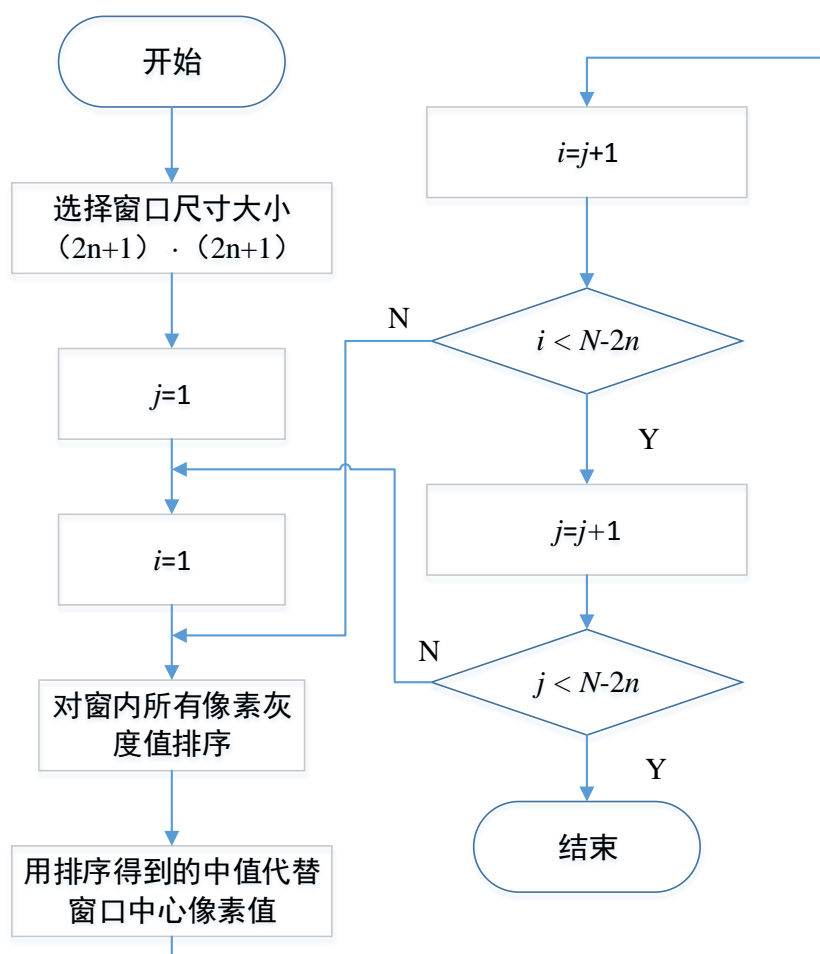


图 12 中值滤波算法流程图



图 13 中值滤波算法处理后的图像

基于阈值的小波去噪算法是目前常用的小波去噪算法，其核心思想是利用图像和噪声经过小波变换以后表现出不同的统计信息来区分图像和噪声。小波去噪算法的原理如图 14 所示，图像频率高的部分经过小波变换以后表现为振幅较大的小波系数，噪声经过小波变

换以后表现为振幅较小的一部分小波系数，根据这一表现形式的不同，可以通过设置阈值的方式过滤振幅较小的小波系数达到去除图像噪声的目的。阈值的大小可以根据不同的情况进行设置，过滤掉小于此阈值的小波系数的图像处理部分，就可以剔除噪声，保留原有的图像处理部分，达到去除图像噪声的目的。

确定合适的阈值是小波阈值去噪过程中非常重要的一个环节，如果设定的阈值偏小，那么小波去噪处理之后的图像肯定还会或多或少存在一些噪声，反之如果阈值选定的偏大，图像的一些重要特征则也会一起被滤除掉，反而会引起失真的现象，所以阈值的选定是一个很重要的环节。小波去噪算法的流程如图 15 所示，含噪图像经过小波分解以后，需要设定合适的阈值对变换后的图像进行去噪，去噪以后再经过小波逆变换还原图像数据，最后根据此数据重构出去噪后的图像。

为了证明小波去噪算法的优劣，最后对小波阈值去噪算法进行了仿真，采用的小波阈值图像去噪算法是选择 sym4 小波以及小波分解的层次为 3，选择阈值为 47.58，对原始图像处理后的图像如图 16 所示，与前两种空域滤波去噪方法对比可发现，小波去噪效果明显要好很多，不仅噪声少了很多，图像边缘也更清晰。由于实际中的安检图像中的噪声可能会有很多种，而小波去噪相对来说对于去除任何一种噪声效果都比较好，所以在实际应用中要采用小波去噪方法处理安检图像，能够很好地达到去除噪声的目的。因此，在物流系统安检图像的处理中采用小波去噪算法对图像进行处理。

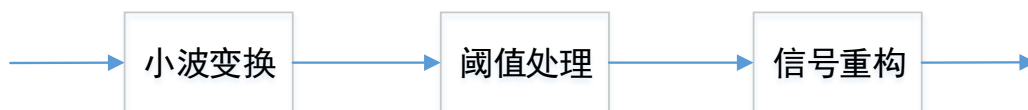


图 14 小波去噪原理

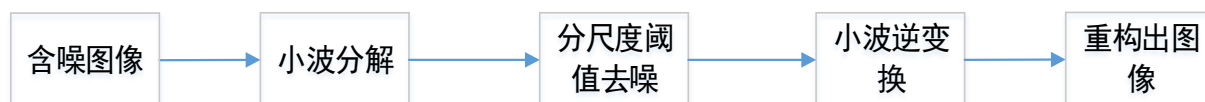


图 15 小波去噪流程



图 16 小波去噪处理后的图像



### 4.3.3 图像恢复算法仿真

本节主要对图像恢复算法进行了仿真验证，仿真的图像恢复算法为盲去卷积处理方法，恢复处理采用的原始图像为小波去噪处理后的图像。

目前，最小二乘滤波法、邻域滤波法、维纳滤波法以及非邻域滤波法是几种常用的图像恢复方法。这些算法都有各自不同的应用场景，但它们的共同点就是进行图像处理之前需要首先获取图像退化模型参数信息，也就是需要先验知识，这对于 X 射线安检系统来说没法使用的。因此，需要采用不需要先验知识的盲去卷积图像恢复方法，它的数学理论基础是基于最大似然估计(MLE)，也就是用那些受随机噪声所影响的量进行最佳估计。盲去卷积图像恢复算法不需要首先获取退化模型参数信息，只需对退化参数进行估计就可进行图像恢复。其优点是既对图像进行恢复，也同时对点扩张函数进行恢复。盲去卷积图像恢复算法在事先对退化图像没有一点先验知识的条件下，一样可以对失真的图像进行图像恢复处理。

为了验证盲去卷积图像处理算法对 X 光图像的性能优劣，对小波去噪处理后的图像(图 16)进行盲去卷积图像恢复处理，处理后的图像如图 17 所示。从图中明显可以看到图像的清晰度有所改善，但是同时也可以看到产生了一些振铃现象，影响了图像质量，所以又对恢复后的图像(图 17)进行了一次均值滤波处理，处理后的图像如图 18 所示，振铃现象有所缓解，图像的整体清晰度也明显好了很多。



图17 盲去卷积处理后的图像



图18 消除振铃处理后的图像

#### 4.3.4 图像对比度增强算法仿真

本节主要对对比度增强算法进行了仿真验证，对比度增强采用的原始图像为图像恢复算法处理过的图像。

图像增强主要是对恢复的图像进行对比度处理，目前常用的图像增强算法也是对比度增强算法，这种算法的核心思想就是通过根据一定的规则来修改处理图像中每一个像素的灰度值，从而达到改变处理图像整个灰度动态范围的目的。改变图像灰度动态范围既可以压缩也可以扩展，甚至是分段处理图像的灰度，主要是根据图像的特征以及处理要求在不同的区间分别进行扩展和压缩。现有的图像增强算法一般是首先进行一阶微分算子法或者二阶微分算子法锐化处理，然后再进行直方图均衡化的对比度增强处理或者是双边滤波器处理。

为了验证图像对比度增强算法的性能，本节对消除振铃处理后的图像（图18）进行对比度增强处理，处理后的图像如图19所示，可以看到图像很好地区分开了背景与物体目标，物体目标突出程度很明显，对比度明显增强。这说明图像对比度增强算法能够增强X光安检图像的对比度，使得图像中目标物体更加清晰。



图19 对比度增强图像

#### 4.3.5 图像锐化算法仿真

本节主要对对比度增强后的图像（图19）进行图像锐化算法实验比较。由于Robert微分算子法对噪声十分敏感，只适用于无噪声图像的边缘检测，故本节没有对此算子法进行实验。因此，本节主要对Prewitt微分算子法和Sobel微分算子法进行了仿真对比分析。

图像锐化处理的目的是为了突出图像的某些细节部分或者增强被模糊的细节，使得图像从整体上来看更加清晰。Prewitt算子法利用对图像进行均值处理能够达到去除噪声的目的，首先对图像像素进行均值处理，然后利用像素之间的差分运算得到最终图像锐化的结果。首先对Prewitt微分算子法进行仿真实验，经过锐化处理后的图像如图20所示。从图中可以看出，图像边缘存在很大的模糊，基本不能区分开各个物质，图像锐化效果不是很好。这说明Prewitt微分算子法对物流安检图像的锐化效果不是很理想，需要选择其他的锐化算法对安检图像进行处理。



图20 Prewitt算子处理后的图像

Sobel算子法本质上是对Prewitt算子法的改进，它采用加权平均的方法，在图像锐化的同时达到了去除噪声的目的。Prewitt算子法采用均值的方法在去噪的同时也会对图像边缘造成一定程度的模糊，Sobel算子法通过在模板中增加一个加权作用，很好的解决上面遇到的问题。Sobel微分算子法是典型的基于一阶导数的边缘检测算子法，由于该算子中引入了类似局部平均的运算，对噪声具有平滑作用，能很好地消除噪声的影响。Sobel微分算子法经常被应用于突出图像边缘的技术当中，经过它处理之后的图像边缘宽度大于二像素，是一个标准量而不是向量。它具有各向同性的性质，即处理结果与图像的突变方向无关。

为了验证Sobel微分算子法的图像锐化处理效果，需要对Sobel微分算子法进行了仿真实验，处理后的图像如图21所示，图像锐化效果明显比Prewitt算子法好很多，不仅突出了图像的边缘，而且还同时去除了少量的噪声，图像锐化效果非常好。



图21 Sobel算子处理后的图像

最后对拉普拉斯算子法进行仿真实验，拉普拉斯二阶微分算子法同样具有各向同性的性质，但是和Robert微分算子法一样比较容易受噪声的影响，所以，一般要先对图像进行去噪处理，然后再对图像进行锐化处理的效果会更好。拉普拉斯算子法处理后的图像如图22所示，尽管与Prewitt微分算子法相比处理效果稍好一些，边缘较为清晰，但与Sobel微分算子法相比，噪声还是明显存在一些，这是因为拉普拉斯微分算子法对噪声比较敏感。所以，经过对比分析以后，物流安检图像处理系统最终采用Sobel算子法对安检图像进行锐化处理。





图22 拉普拉斯算子处理图像

#### 4.3.6 图像分割算法仿真

图像分割的目标是提取出属于要求灰度范围的特征部分图像出来。在安检设备实际应用中，一般重点是提取出诸如与炸弹、重金属灰度范围类似的那些特征图像，最终达到检测危险品的目的。因此，本文主要对基于阈值分割算法和基于区域提取分割算法进行对比实验分析。

基于阈值的图像分割算法是目前图像分割技术中应用最广泛也是历史最悠久的一种基本算法，算法的版本非常多。其核心的思想是根据图像的灰度范围信息确定若干个合适的阈值门限，根据阈值门限对图像中的每个像素的灰度值进行分类，通过将图像像素分为不同的类型，就可以将图像分为若干个不同的区域，实现图像的分割。在使用基于阈值的图像分割算法在对图像进行分割前，首先要初步估计图像分割的目标，大概知道图像分割的要提取的目标是什么类型，图像分割成几大块区域等。一般情况下，处于相同背景范围内的相邻图像像素之间的灰度值或选取的图像特征信息之间的灰度值应该接近，如果相差较大，则应该区分开来。

本节采用经过Sobel算子处理后的图像（图21）进行图像分割算法实验比较。基于阈值的图像分割算法采用的是最大方差自动取阈值法，处理后的图像如图23所示，再对图像采用半径为4的disk模板进行先闭后开运算的形态学处理后的图像如图24所示。从图中可以看出，虽然杂点相比形态学处理前少了很多，但还是存在着一些较为明显的杂点区域，分割效果不是很理想。

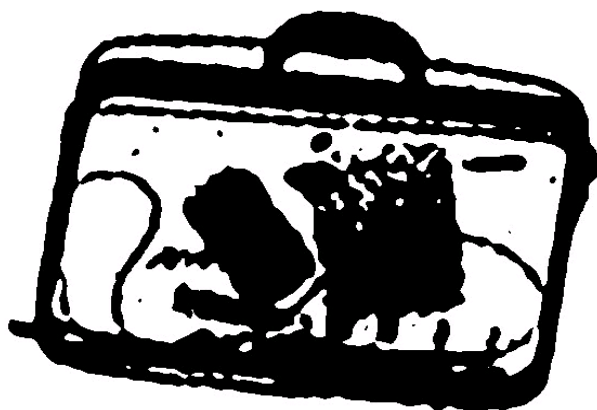


图23 阈值分割图像



图24 阈值分割后形态学处理图像

基于区域生长的图像分割算法是把具有相似性质的一堆像素统一归纳起来构成不同的区域。首先需要在分割区域选择一个种子像素作为生长的起点，按照预先定义的生长准则把种子像素邻域中与种子像素具有相同或者类似属性的像素集合到种子像素所处所在的区域之中。以此类推，后面继续找出新的像素种子，作为生长起点集合周围类似属性的像素或者子区域，这样一个较大的区域就产生了。基于区域生长的图像分割算法一般分为三步：选取种子、制定生长准则以及停止生长的准则。其中关键步骤就是定义生长准则，生长准则直接影响图像分割的整个过程。一般定义生长准则的方法有两种，一种是基于区域灰度差的方法，另外一种是基于区域内灰度分布统计性质的方法。本文采用的是基于区域灰度差的方法。

基于区域生长的图像分割处理后的图像如图 25 所示，同样再对此图像采用半径为 4 的 disk 模板进行先闭后开运算的形态学处理后，如图 26 所示，可以看到分割效果好了很多，图像的边缘清晰可见，杂点区域几乎没有，图像质量明显改善很多，基本能够实现很好的区分开不同的物质。为了便于人观察，需再对图 26 进行伪彩色处理，处理后的图像如图 27 所示。

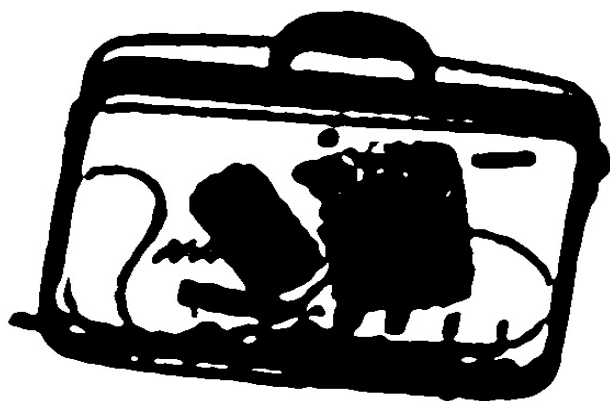


图25 区域生长法分割图像

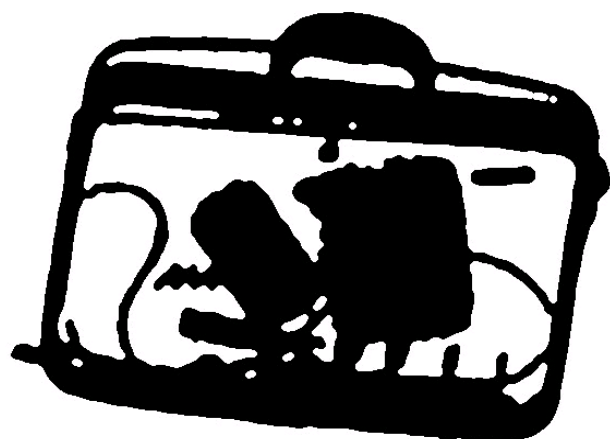


图26 区域生长法分割后形态学处理图像



图27 伪彩色图像

### 4.3.7 仿真结果分析

为了更好地选择合适的算法应用于基于FPGA的X光安检图像处理系统中，本章基于MATLAB对图像去噪、图像恢复、图像增强、图像锐化以及图像分割几个方面的传统算法进行了实验对比分析。从仿真结果可以看出，在图像去噪算法方面，小波阈值去噪算法对去除噪声的效果最为理想，对于噪声来源和类型较多的物流系统安检图像来说较为合适；在图像恢复算法方面，采用盲去卷积方法能够明显改善图像质量，但会引入振铃现象，再用均值滤波处理后能明显缓解振铃现象，提高图像的清晰度；在图像增强算法方面，采用对比度增强算法处理后的图像，物体目标突出明显；在图像锐化算法方面，采用Sobel算子法对安检图像进行锐化处理的效果明显好于其它几种算法；在图像分割算法方面，采用基于区域生长的图像分割方法效果要优于其它图像分割算法。根据仿真结果，可以得到应用于物流安检图像处理系统的图像处理算法流程，流程图如图28所示。此组合能够很好的实现图像去噪、图像恢复、图像对比度增强、图像锐化、图像分割五个方面的功能。与通用的安检系统图像处理流程相比，本流程针对物流安检图像的特征，在图像恢复环节增加图像去噪处理，实现图像更加清晰的处理。虽然算法流程略显简单，但最终也能得到适合人眼辨别清晰的安检图像，而且如果采用复杂的图像处理算法会加重对于安检系统硬件方面的要求，从而提高了系统成本，所以本文得到的算法流程能够很好的适用于物流系统安检双能量X光机系统。

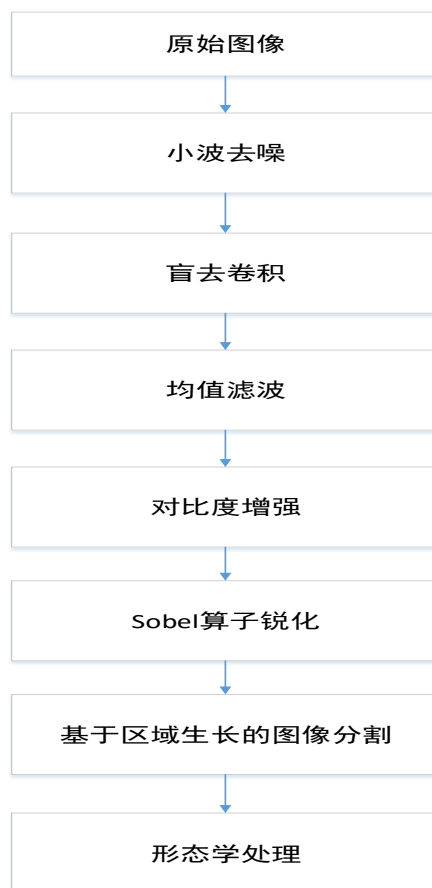


图28 物流安检图像处理算法流程图

4.4 系统测试

以上对图像处理算法进行了仿真，从定性的角度证明了图像处理算法的优越性，为了进一步证明该算法流程对物流安检图像处理的优点，本节对该图像处理算法流程进行定量的测试，对比对象为传统的图像处理流程。定量测试采用的测度参考文献[45]中提出的四种测度，分别是能量梯度函数、图像熵、图像清晰度和Tenengrad Value四种评价标准，详细的计算方法可以参考文献[45]中给出的计算公式，测试的结果如表3所示。

表3 两种算法流程的测试结果对比

算法	能量梯度/10 <sup>4</sup>	图像熵	Tenengrad Value/10 <sup>9</sup>	图像清晰度
传统算法流程	1.1399	7.3725	1.9974	0.0301
本文提出算法流程	1.2333	7.8756	3.1588	0.0601

从表3中可以看出，本文提出的图像处理流程与传统的图像处理算法流程相比具有更高的评价测度值。从各项指标来看，经过本文提出的图像处理流程处理后的图像性能指标均优于传统图像处理流程处理后的指标，这说明本文提出的算法流程能够更好地改善物流安检图像质量，提高物流安检系统的精度和速度。

4.5 本章小结

本章主要介绍了基于FPGA的X光安检图像处理系统的设计和实现，首先在分析现有图像处理系统的基础上给出了基于FPGA的X光图像处理系统设计方案；其次，基于MATLAB工程仿真工具对几类图像处理算法进行了实验对比分析，得到了适合X光安检图像的最佳数字图像处理算法组合，该算法组合能够很好地实现图像去噪、图像恢复、图像对比度增强、图像锐化、图像分割等五个方面的功能，能够很好地应用于双能量X光机安检系统；最后对仿真实验结果进行了分析并给出了算法组合的流程图。为真正实现基于FPGA的图像处理系统奠定了基础。

## 第五章 总结与展望

### 5.1 总结

随着社会的不断发展和科学技术水平的不断提高,安全稳定问题成为世界各国关注的重点。目前,安检系统特别是双能量 X 光安检机在保证安全稳定工作中发挥着重要作用。但由于技术水平的限制,X 光安检系统采集到的安检图像总是存在着噪声多、边缘模糊等影响辨识度的问题。特别是物流系统货物存在货物量大、种类繁多和排列紧密的特点,使得 X 光安检系统中的这一问题更加突出。在安检系统中,图像处理能力的强弱直接制约着安检系统对违禁危险品的检测精度。因此,为了提高安检图像的质量从而提高危险品检测技术的检测精度,世界各国普遍加大了对于技术研究的投入,特别是图像处理系统方面的研究。在此背景下,本文的研究目的就是 from 图像处理系统着手,研究出一种适合物流系统 X 光机安检图像的数字图像处理算法,从而提高安检图像的质量,提高危险品检测技术的精度。本文主要的研究工作总结如下:

1. 首先介绍了课题研究的背景和意义,并对国内外 X 射线安检系统的研究现状进行了总结分析,并结合目前危险品检测技术存在的问题,指出了安检系统未来发展的方向,进一步明确课题的研究目标,为后续工作的开展打下了基础。

2. 对 X 光机系统组成以及成像原理与技术进行了分析和总结,首先介绍了 X 射线安检系统的主要组成,包括 X 射线发生器模块和 X 光机成像模块;其次详细描述了 X 光机的成像原理,包括单能量和双能量 X 射线物体识别技术原理;最后对 X 光机的成像技术进行了阐述。

3. 对物流系统 X 光图像特征和现有的图像处理算法进行了分析和对比,首先分析了物流系统 X 光图像的各种特征以及影响图像质量的各种因素,并对 X 光图像噪声的来源和类型进行了总结;其次结合 X 光图像存在的问题,对现有的图像处理算法进行了调研和分析,并对比了各种图像处理算法的优缺点,指出了各种算法的应用场景。

4. 首先在分析传统图像处理系统的基础上,针对物流系统货物安检速度高的要求,基于 FPGA 设计了一种适合于物流安检图像的图像处理系统方案;其次,针对物流系统安检 X 光图像存在种类繁多和排列紧密的特征,利用 MATLAB 强大的图像处理能力对从图像去噪、图像恢复、图像对比度增强、图像锐化及图像分割等五个方面分别对安检图像进行图像处理实验,目的是为了最终达到减少噪声、突出边缘的效果,从而提高图像整体清晰度和辨识度。经过一系列实验结果对比分析,最终提出了小波去噪、盲去卷积、均值滤波、对比度增强、Sobel 算子锐化、区域生长法图像分割的图像处理算法流程,通过此算法流程对物流系统安检图像进行处理之后能够很好解决安检图像遇到的问题,并从定性和定量两个角度对此算法流程进行了对比验证,证明本文提出的图像处理流程提高了安检图像的整体质量和危险品检测技术的精度,同时很好地为双能量 X 射线安检机危险品的检测起到

了帮助的作用。

## 5.2 展望

由于研究时间较短，本课题虽然取得了一些成果，但尚存一些问题仍然亟待解决和完善，主要包括以下几个方面：

1. 经过一系列的仿真实验对比，课题虽然得出了一个目前适合物流安检系统的图像处理算法流程，但该算法流程还需在真正的硬件平台中检验测试，这也是我们下一步要重点开展的工作。

2. 安检系统面临的物品各种各样，成分种类复杂，不同物质成分在不同能量 X 射线照射下成像特性也不同，为进一步提高成像质量，还需对成像特性进行深入的分析和研究。

3. 由于双能量X射线物体识别技术自身或多或少存在一些不足，假设未来研究可以将反向散射技术、液体检测技术等其它危险品检测技术与双能量X射线技术相结合的话，必然可以取得更好的研究进展，进一步提高危险品检测技术的准确率。

## 致 谢

光阴如梭，转瞬即逝，不知不觉，几年的硕士研究生学习生涯已接近尾声。从刚入学时的踌躇满志，到参与单位项目系统开发的汗水与不易，直到今天学位论文即将付梓，虽历尽艰辛，亦收获颇丰。

首先，我要特别感谢我的导师吴灏教授。在攻读研究生期间，吴教授在学习和生活中都给予了我无微不至的指导点拨和关怀帮助。尽管我在单位工作，与教授身处两地，但吴教授仍然时常通过邮件、电话方式给予对工程开展的指导、鼓励，使我能够顺利地完成任务。特别是在论文撰写阶段，导师多次利用出差时间，在百忙之中当面为我梳理选题思路、明确论文结构，并在诸多技术细节方面给予启发性的指导。可以说，吴教授的治学严谨、学识渊博、平易近人和言传身教，是我顺利完成此论文的重要保证。他的诸多教诲将使我终生受益，在此衷心感谢导师对我整个研究生生活的无尽帮助。

其次，我要感谢我在单位的导师纪维宁高工，他在我的课题研究和论文撰写工作中给予了很大的帮助，纪老师具有丰富的工程研发经验和深厚的理论研究水平，本论文所涉工程中我在各阶段的研究进展，都离不开他的悉心指导。

最后，我还要感谢我的父母和家人，没有他们的支持，我不可能顺利完成研究生的学习工作，感谢他们一如既往的理解支持！

同时对百忙之中参与我论文评审并提出宝贵意见的各位专家、教授和老师们的致以诚挚的谢意！

李佳欣

2015 年 10 月



## 参考文献

- [1] 胡又增. 直接数字化 X 射线摄影 [J]. 世界医疗器械, 1998, 4(3): 10-11.
- [2] Martin Annis, Paul Bjorkholm, David Sehafer. Automatic detection of explosives using X-ray imaging [J]. ASTM Special Technical Publication, 2002, 11(27): 68-81.
- [3] Stephen W. Kereel, Robert S. Burlage, David R. Patek, Cyrus M. Smith. Novel methods for detecting buried explosive devices [J]. SPIE, 1997, 25(13): 467-476.
- [4] 吴斌. 安检用 X 光机的图像处理技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
- [5] Tong gang, Fu dongji. The Research & Application of the Detection Capability of Dangerous Goods in Daul-Energy X-Ray Security Equipment [J]. 2009 IEEE Changsha China, 2009, 10(9): 10-12.
- [6] 张里仁等. 医学影像设备学[M]. 北京: 人民出版社, 2000. 8.
- [7] Peter Kolla. Detecting hidden explosives [J]. Analytical Chemistry, 1995, 67(5): 184-189.
- [8] 张君杰. X 光图像实时处理采集系统的研制 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [9] 付东纪. 安检 X 光机的图像处理研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2010.
- [10] 张奎. 医学影像—X 光透视图像处理研究方法研究 [D]. 山东: 山东科技大学, 2001.
- [11] 孙丽娜. X 射线安检设备中物质分类识别方法的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2003.
- [12] Fainberg A. Explosive detection for aviation security [J]. Science, 2002, 255(3): 1531-1537.
- [13] 原培新, 孙丽娜. 双能量 X 射线透射条件下物质分类识别曲线的建立 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(3): 336-338.
- [14] 陈树越, 路宏年等. X 射线数字成像噪声特性及噪声消除方法研究 [J]. 无损检测, 2001, 1(5): 9-13.
- [15] 但唐仁, 田景全等. 低强度 X 射线影像系统的噪声分析及图像去噪处理 [J]. 光子学报, 2002, 23(6): 616-618.
- [16] 杨晓刚, 杨立瑞. X 射线安检图像增强方法研究 [J]. CT 理论与应用研究, 2012, 21(4): 705-712.
- [17] Rafael C.Gonzalez, Richard E.Woods, Steven L.Eddins. 数字图像处理 (MATLAB 版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. 48.
- [18] 夏良正. 数字图像处理[M]. 南京: 东南大学出版社, 1999. 37.
- [19] 陈亚明. 隔行视频信号转逐行的算法模型和实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2006.
- [20] 杨缪. 基于 Contourlet 的图像去噪算法研究 [D]. 南京: 西安电子科技大学, 2006.
- [21] Rafael C.Gonzalez, Richard E.Woods, Steven L.Eddins. 数字图像处理[M]. 北京: 电子

工业出版社, 2006. 20.

[22] 钟永智. 数字 X 射线图像处理及其应用 [J]. 电视技术, 1995, 11(4): 53-59.

[23] Deryn Graham, Anthony Barrert. Knowledge Based Image Processing System [J]. Springer-Verlag, 2000, 21(8): 81-83.

[24] WU Z, HUANG N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method [J]. Springer-Verlag, 2003, 15(11): 1101-1113.

[25] 王剑平, 张捷. 小波变换在数字图像处理中的应用 [J]. 现代电子技术, 2011, 34(1): 91-94.

[26] 刘鹏远, 骆升平. MATLAB 基于小波变换的图形图像处理 [J]. 江西理工大学学报, 2011, 32(1): 66-68.

[27] 但唐仁, 田景全等. 一种基于小波相位信息的低强度 X 射线成像系统的图像去噪方法 [J]. 电子学报, 2004, 32(6): 977-979.

[28] 赵松年, 熊小芸. 小波变换与小波分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998. 51.

[29] 章毓晋. 图像工程(上册)-图像处理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999. 45.

[30] 覃凤清, 徐家品. 基于小波的图像复原 [J]. 大众科技, 2006, 1(3): 32-34.

[31] 杨词银, 黄廉卿. 正灰度变换的 X 光图像增强 [J]. 光学技术, 2002, 28(5): 407-408.

[32] 贾花萍. 盲去卷积算法在图像恢复中的应用研究 [J]. 信息技术, 2011, 33(5): 38-39.

[33] M.R. Mahzoun, K. okazaki, et al. Detection and Complement of Hexagonal Borders in Corneal Endothelial Cell image [J]. Medical Image Technology, 1996, 14(1): 56-59.

[34] 耿生玲, 田芳. 图像的平滑和锐化的原理及实现 [J]. 青海师范大学学报, 2003, 12(3): 62-65.

[35] 董长虹等. MATLAB 图像处理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. 89.

[36] 杨暄. 双能量 X 光图像分割与识别技术及其应用研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2002.

[37] 欧阳晶. 小波变换在图像去噪中的应用研究 [D]. 南昌: 江西师范大学, 2006.

[38] Vilarino D L, Cabello D, Pardo X M, et al. Cellular neural networks and active contours: a tool for image segmentation [J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(6): 189-204.

[39] 姚宇华, 严洪, 蒋立正. 基于局部最大方差分割的图像二值化算法 [J]. 微型电脑应用, 2003, 19(8): 321-323.

[40] S Wang, J M Siskind. Image segmentation with ratio cut [J]. Image and Vision Computing, 2003, 25(6): 675-690.

[41] 付忠良. 图像阈值选取方法的构造 [J]. 中国图象图形学报, 2000, 5(6): 466-469.

[42] Pal N R, Pal S K. A review on image segmentation techniques [J]. Pattern Recognition, 1993, 26(9): 1277-1294.

[43] Lisboa P G J. 现代神经网络应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1996. 45.

[44] 程宏煌, 戴卫恒, 姚廷姓. 图像分割方法综述 [J]. 电信快报, 2000, 2(10): 39-41.

- [45] 郑林涛, 董永生, 史恒亮. 一种新型 X 射线安检图像增强算法[J]. 科学技术与工程, 2014, 14 (23): 7-11.

# 作者简历

## 一、个人简历(教育经历和工作经历)

李佳欣，男，1983 年 1 月出生，北京海淀人。

2005 年 6 月毕业于解放军信息工程大学，无线电工程专业，获学士学位；

2010 年 10 月入解放军信息工程大学读硕士研究生。

## 二、攻读硕士学位期间发表的学术论文

1. 宽带线/圆极化转换反射阵设计，《第三届仪器、测量、计算机、通信与控制国际会议（IMCCC2013）论文集》，2013 年 8 月，第二作者。