

东南大学

硕士学位论文

连续能谱X射线透射图像的物质鉴别和安检系统研究

姓名：徐明刚

申请学位级别：硕士

专业：生物医学工程

指导教师：鲍旭东

20070117

摘要

论文题目： 连续能谱 X 射线透射图像的物质鉴别和安检系统研究

研究生姓名： 徐明刚

导师姓名： 鲍旭东教授

学校名称： 东南大学

本文主要论述了连续能谱 X 射线透射成像安检系统的数据接收与成像,减小厚度影响的物质属性鉴别,后期的数字图像处理, 以及安检系统的视频采集和回放技术。

基于 X 射线的透射性和衰减性, X 射线透射成像技术广泛应用于车站、机场等场所的安全检查设备中。不同物质由于原子序数以及厚度的不同, 对 X 射线的具有不同程度的吸收作用。从射线源发出的 X 射线穿透物体, 经过不同程度的衰减, 由闪烁晶体型的 X 射线探测器检测得到原始数据。经过数据处理和数字图像处理, 最后显示出物体的透射图像。

本文使用伪双能 X 射线透射安检系统实验模型。射线源发出的是连续能谱的 X 射线, 探测器采用双能量探测器, 高低能探测器响应不同能量谱段的 X 射线, 对应高低能的透射数据。传统方法利用高低能值计算出对应物质等效原子序数 Z_{eff} 的 R 值, 根据 R 值的大小判别物质。这种方法存在明显的物体厚度效应, 影响结果的准确性。本文详细论述了一种基于传统方法扩展的减小厚度影响的物质属性鉴别方法, 引入二维 R - L 物质属性特征空间, 在高维特征空间中鉴别物质属性。

图像处理部分主要论述了一种结合物质属性, 基于 HSL 色彩空间的透射图像伪彩上色方法。以及伽马校正等调节方法。数字图像处理方法的运用可以提高显示图像的质量, 使得透射图像的层次更加丰富。更好效果的分类物质伪彩图像使物质判别更加直观清晰和有效。

安检系统的视频采集和回放技术, 在安全检查时, 同步记录下行李包裹的视频数据。系统可以从存档的包裹记录中检索出对应的视频进行回放。该技术能够满足安检设备较高的安全要求, 以及为历史记录的查询提供更加全面的信息资料。

关键词: X 射线, 透射图像, 物质识别, 厚度影响, 伪双能, 连续能谱, 物质属性, R - L 平面, 隶属度, 伪彩色, 伽马校正, 数字图像处理, 视频采集回放

ABSTRACT

Title: Study of Key Problems in Pseudo Dual-Energy X-ray Based Luggage Inspection System
Author: XU Minggang
Supervisor: Prof. BAO Xudong
School: Southeast University

The data acceptance and imaging display, the object classification suppressed thickness effect, the digital image process, and the security video capture and playback technology are mainly discussed in this dissertation.

X-ray devices have demonstrated the ability to characterize a material at the molecular and atomic level, and many pseudo dual-energy commercial systems have been applied in public traffic stations since past decades. The attenuation of X-ray is related to the object's atomic number and thickness. After data processing detectors received, the images of object can be displayed on the screen.

The model of a prototype scanning system we used is pseudo dual-energy X-ray transmission imaging system. The X-ray tubes adopted in this system produce X-ray photos with continuous energy spectra. The high and low energy data are received by two groups of scintillation detectors which are energy dispersive. Results of object classification based on traditional dual-energy transmission models decrease the correctness because of the thickness effect. Besides the ratio of the logarithms of measurements individually from higher and lower energy detectors, the attenuations of photons were added to feature space for object classification. According to the high dimension feature space, we called R-L plane, the results indicated the improvement of correctness.

In the image processing part, several methods are introduced to improve the quality of transmission images. The false color method based on the HSL color space, combined with the object attributes, renders the image with orange, green and blue for organic, mixed and inorganic material. The methods of Gamma rectification and data filter make images more vivid.

The security video capture and playback technology records the video of luggages and their belonger while inspection. The history of videos can be searched and played back. It provides more information about history inspection, and enhances the security of the system.

Key words: X-ray, transmission image, object classification, thickness effect, pseudo dual-energy, continuous energy spectra, material property, R-L plane, false color, gama rectify, digital image process, video capture and playback

东南大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个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或撰写过的研究成果，也不包含为获得东南大学或其它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表示了谢意。

研究生签名：徐刚 日期：2006.12.7

东南大学学位论文使用授权声明

东南大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权东南大学研究生院办理。

研究生签名：徐刚 导师签名：刘世芳 日期：2006.12.7

第一章 绪论

1.1 课题背景及意义

当今世界，反恐、反破坏的形势十分严峻。安全是一个各个国家都非常重视问题，我们国家也不例外。今年来，政府和相关职能部门反恐的力度越来越大，对道路运输安全的重视程度也越来越高。

一定数量的旅客安全意识较差，会不自觉地将一些危险品，如管制刀具，枪支，汽油，雷管等等物品的装在行李包裹中，带上车船、飞机等运输工具，对运输安全产生极大的威胁，造成的安全事故也不在少数。恐怖分子甚至会将一些爆炸品，如塑胶炸药等隐藏在行李物品中，伺机制造破坏活动。

基于上述情况，X 射线行李包裹安全检查设备广泛应用于车站、机场等场所的危险品检查。相对于其它的安全检查技术来说，其具有两点明显的优势：

1. 自从 1895 年发现 X 射线以来，经过科学家一个多世纪的研究，基于 X 射线的各种特性的技术应用已经相当成熟。使用 X 射线的检查装置，其检测能力能够达到分子和原子的水平，从而具有识别装在容器内或者包裹内的物品的能力；
2. X 射线已经成功地在医学成像诊断领域应用了很长时间，大量实验表明只要放射剂量控制合理并且防护得当，X 射线无论是对检查人员还是对行李包裹，都是安全的；并且由于技术的成熟性，X 射线的设备制造成本相对于其它相关技术比较低廉，适于安检方面的使用。

通过使用 X 射线透射成像安检系统，安检人员就可以不开包对行李包裹进行检查。在单能的透射图像上，安检人员能够从物体的外形、轮廓上辨别出是否违禁物品；而在双能的透射图像上，系统的物质属性鉴别技术能够使安检人员更加直观便捷地分辨物品，并且这种方法无需依靠物品本身的外形轮廓，能够更加有效的检测出如炸药、毒品等具有任何形状的违禁物品。

在实验室已经研发出 X 射线安全检查设备原型的基础上，本课题在设备、功能、应用实现上对其做进一步研究和开发，使其功能更加完善和强大、应用技术更加成熟。

1.2 X 线安检系统

基于 X 射线成熟的理论和技术，国内外有许多厂商都使用 X 射线源开发出了危险品安全检查设备。如德国 Heiman 公司生产的 HI-SCAN 系列，美国 PerkinElmer 公司生产的线扫描系列和车载式安检系统等，国内有公安部一所生产的 FISCAN 系列，清华同方和上海东影公司生产的安检系列设备等^{[1][2]}。

目前有多种 X 射线传感器技术应用于安检领域。根据使用的 X 射线源和探测器的不同，安检系统可以分为单能和双能两种。单能系统使用一个 X 射线源，产生扇形的 X 射线面穿过待检的物体，射线经透射衰减后的光子信号由一组 X 射线探测器接受，并转化为电信号输入计算机系统，经过数据处理形成透射图像显示到屏幕上。这种系统又称为标准 X 射线扫描系统，能够形成行李包裹的灰度图像。检查人员主要依靠图像中物体的外形和轮廓判别物质，对检查人员的经验要求较高。双能系统按照实际使用的 X 射线源个数，又可以分为真双能和伪双能两种系统。真双能系统使用两个发射能量不同的射线源，高能源发射的 X 射线具有较高的能谱曲线，低能源发射的 X 射线具有较低的能谱曲线，同时采用高、低能两组探测器分别接受高能衰减信号和低能衰减信号。将获得的两组数据进行算法处理，就可以得到与物体等效原子序数相关的属性值。计算机可以根据不同物质的属性值做自动判别处理，在透射图像上将不同的物质以不同的颜色显示出来。双能系统较单能系统具有更准确、更便捷的自动判别功能，对安检人员的经验依赖性大大减小，是应用最为广泛的 X 射线安检系统。而伪双能系统与真双能的不同之处是只使用一个 X 射线源，采用两组具有高低能谱不同响应的探测器分别响应 X 射线透射衰减后的高能部分和低能部分。其物质属性

的计算方法和真双能系统一样,但是由于单个射线源产生的是多色谱的缘故,需要对接收到的数据做进一步的处理以增强其物质判别的准确性。

根据接收的 X 射线数据的不同,安检系统可以分为透射和散射两种。X 射线的穿透性是 X 线透射成像的基础。透射系统在正对着 X 射线源发出的扇形射线面的位置上安置的 X 射线探测器,待检的物体位于射线源和探测器之间,探测器接收射线透射过物体后的衰减信号。X 射线的透射信号反应了被照物体的等效原子序数和厚度的信息。散射系统主要是测量 X 射线在照射物体后的康普顿散射信号^{[3][4][5]}。前散射探测器安置在射线源的对侧,透射探测器的两边;背散射探测器安置在射线源同侧的两边(如图 1-1 所示)。X 射线的散射信号反应了被照物体密度信息。这对于许多低原子高密度的爆炸品如塑胶炸药等的检测判别具有重要的意义^{[6][7][8]}。

根据成像视角的不同,安检系统又可以分为单视角和多视角两种。如上所述的单能,双能和透射系统均属于单视角系统。多视角 X 射线成像技术是为了解决单视角下的二维图像在判别重叠物质上的不足而发展起来的一项技术。多视角系统可以使用多个 X 射线源,从两个甚至几个不同的角度照射待检物体,从而得到几个不同视角的二维图像,进而重建出物体的三维视图^[9-13]。因为有多个视角的图像,就可以减小单视角下,沿射线源方向上若有物体重叠会影响物质判别准确性的弊端,也可以使二维图像中,隐藏在其它物体后面的物质被显现出来。另一种多视角系统是运用了 CT (Computer Tomography) 成像技术的安检系统。该系统原理如同医用 CT,从很多方向对三维物体的一个断面进行扫描和采集数据,将这些与物体断面结构相关的数据依据一定算法逆运算得出断面结构的信息参数,形成物体的断面图像,物体众多的断面图像由计算机重构,最后显示出物体的三维图像。这种方法可以完全解决物体重叠和遮挡的问题,庞大的信息量可以极大的提高物质判别的准确性。但是巨大的信息量需要计算机做大量复杂的数据计算和处理。计算处理时间过长,检查速度缓慢,制造成本过高,射线剂量较难控制等因素限制了它的发展和普及^{[14][15]}。

目前对于 X 射线安检系统的研究,主要集中在现有基础上提高物质判别的准确性(双能系统),提高图像的显示质量,发展爆炸品的检测判别方法和多视角视图方面^{[16][17][18]}。

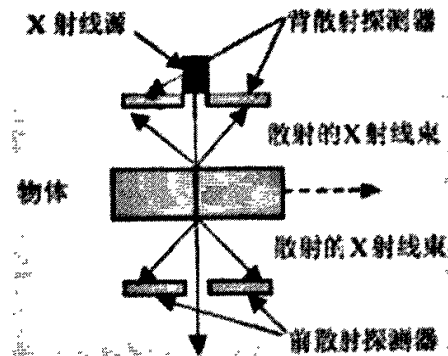


图 1-1 散射探测器的安置位置

1.3 研究条件及假设

本论文研究采用的实验模型为上海东影公司生产的 EI 系列伪双能透射成像安检设备(如图 1-2 所示)。系统使用一个 X 射线源,射线源的管电压值为 140kV,管电流值为 0.7mA,探测器采用 CsI:Tl 闪烁晶体^[19],由低能探测器之后叠加高能探测器构成,在高低能探测器之间装一铜滤波片。射线源产生连续能谱的 X 射

线，透射过物体后，先由低能探测器吸收，经过铜滤波片滤波之后再由高能探测器吸收。因为 X 射线源是多色的，使用理论上的单色源的物质属性计算公式会导致明显的厚度影响。另外，高低能探测器相隔铜片重叠放置，吸收单源射线，也会导致两种能量探测器的吸收谱线的重叠，即低能探测器会吸收一部分高能谱线，而一部分的低能谱线也会漏过铜滤波片被高能探测器吸收，对物质判别结果的准确性造成一定的干扰。

由于实验条件的限制，我们无法得到 X 射线源发射谱的能谱曲线，以及高低能探测器的探测效率。我们假设射线源的发射谱符合标准的 X 射线能谱曲线^[20]，高低能探测器的吸收谱线也与理论的吸收谱线相符^[21]。这会对物质判别的计算结果的准确性带来一定的误差。实验基于单视角安检系统，因此没有考虑消除场景中的物体重叠的情况，我们假设在待检物体在 X 射线的照射方向上不存在重叠和遮挡，如果是物体混合的场景，如实际的行李包裹，则将重叠部分视为同一个等效物体进行处理。



图 1-2 BI 系列 X 射线安检设备图

1.4 论文的主要工作和结构

本论文主要就提高实验系统的物质判别的准确性，增强透射图像的成像显示质量，完善及扩展安检系统的功能这几个方面做进一步的研究开发。具体完成的工作如下：

(1) 在原有的实验系统基础上，改进软件框架，完成基于 USB2.0 的高速数据接收模块，并完善接收后数据的管理功能；

(2) 改进传统的双能物质属性计算方法，将物质的属性空间由原来的一维扩展到二维的 R-L 平面，研究出针对与连续能谱 X 射线系统的，减小物体厚度对物质判别准确性影响的实用算法；

(3) 针对实验系统的数据特性，设计结合灰度信息和物质判别信息的伪彩色编码，将灰度图像较好的过渡到彩色图像的显示，并使用图像处理方法提高显示质量；

(4) 扩展系统功能，完成检查的行李包裹对应的视频采集存储和检索回放模块，提升了系统的安全等级，为安全检查提供更加完备的记录信息。

本论文共有以下七部分组成：

第一章，对本课题的研究背景和意义，研究现状和实验条件和假设做了概述。

第二章，论述了 X 射线透射成像系统的基本原理，包括 X 射线的基本特性，透射和散射以及成像的理论基础。

第三章，论述了实验采用的伪双能透射系统的探测器和探测信号的采集技术，USB2.0 高速数据传输，和数据管理系统。

第四章，论述了双能物质属性计算的改进方法，使用理论的属性计算公式处理探测数据，得出一维的物质属性值后，引入 X 射线的衰减因子，构造二维的 R-L 平面，在高维的属性空间中研究减小物体厚度影响的物质属性算法。

第五章，论述了双能 X 射线透射图像的伪彩色编码设计，以及为提供更加清晰及层次感丰富的图像使用的数字图像处理方法。

第六章，论述了系统的现场场景采集及交叉检索功能模块的设计。

第七章，总的结论，并对安检系统今后的研究发展方向做了展望。

第二章 X 线透射成像原理

2.1 X 线的产生原理及其光谱特性

2.1.1 X 线的产生及原理

X 射线是一种波长极短，能量很大的电磁波。其波长约在 $0.001\sim 100\text{nm}$ ，介于紫外线和 γ 射线之间，是由德国物理学家伦琴（W.C.Röntgen）与 1895 年发现的，故又称为伦琴射线。产生 X 射线的装置是 X 射线管。X 射线管是由阴极和阳极组成的真空二极管，阴极装有灯丝，通电后发射电子，阳极（靶极）用钨靶和散热装置制成，在高压加速的电子束作用下发射 X 射线。产生 X 线的辅助设备还有变压器和控制装置。变压器包括射线管灯丝的降压变压器，和高压电（ $40\sim 150\text{kV}$ ）的升压变压器，控制装置包括射线开关，电压调节等。产生 X 射线的主要装置如图 2-1^{[22][23][24]}所示：

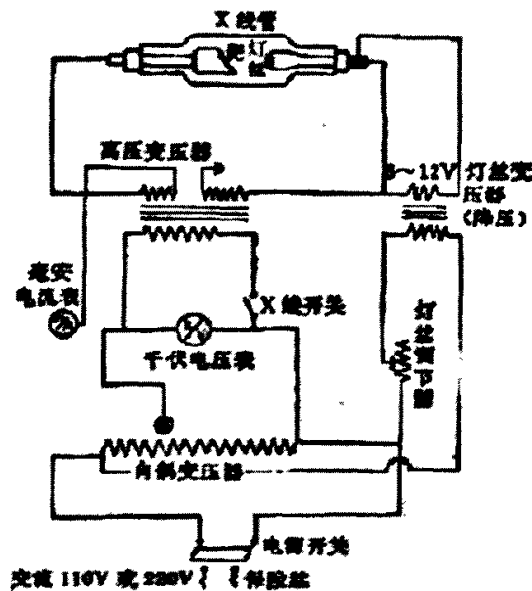


图 2-1 X 射线的产生装置图

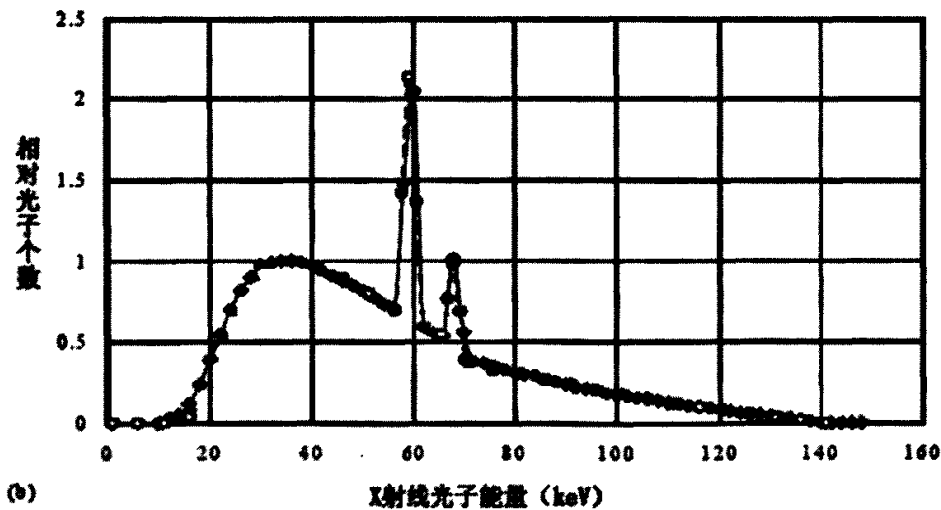
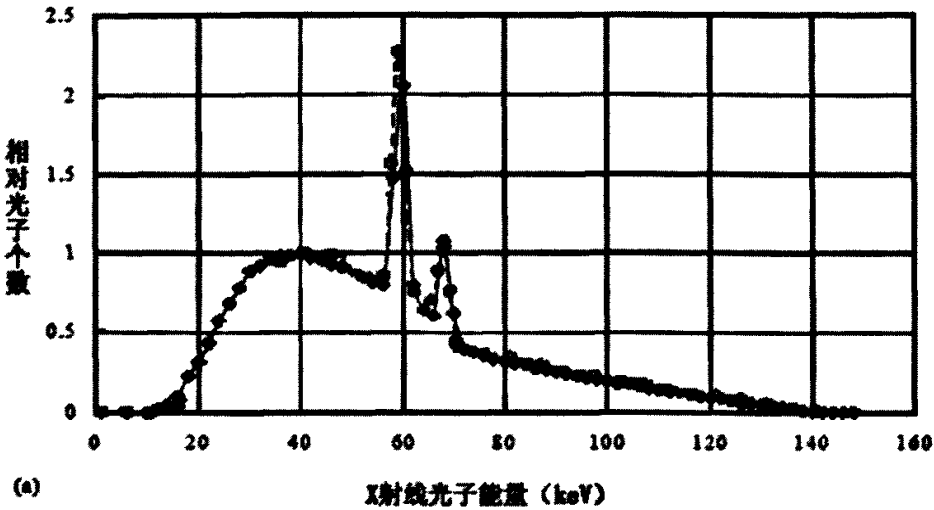
X 射线产生的原理是，当 X 射线管的阴极灯丝被电流加热到白炽状态时，在阴极周围就会产生活跃的自由电子，此时在升压变压器的作用下阴阳两极之间充满高压，这些自由电子受高压影响，成束地高速飞向阳极，在与钨靶相撞之后，失去自己的能量，失去能量的一部分以光子的形式辐射，这样的光子流就是产生的 X 射线。

2.1.2 X 射线的光谱特性

X 射线的光谱由连续谱和标识谱两部分组成，标识谱重叠在连续谱的背景之上。连续谱是电子束撞击靶极而产生的轫致辐射，这个过程产生波长连续变化的谱线，其短波极限由加速电压决定。标识谱是因为电子撞击时靶极元素内层电子跃迁产生，反映了原子壳层的结构特征，标识谱线完全取决于靶极的物质材料。

由于实验条件的局限性，我们没有能够获得 BI 机型采用的 X 射线源的光谱曲线。为此我们参照 GE，

Pentak 和 Eimax 三家公司生产的 X 射线源的光谱曲线^[20], 作为理论研究和判断的参考。图 2-2 为三家公司射线管发射的 X 射线光谱图。



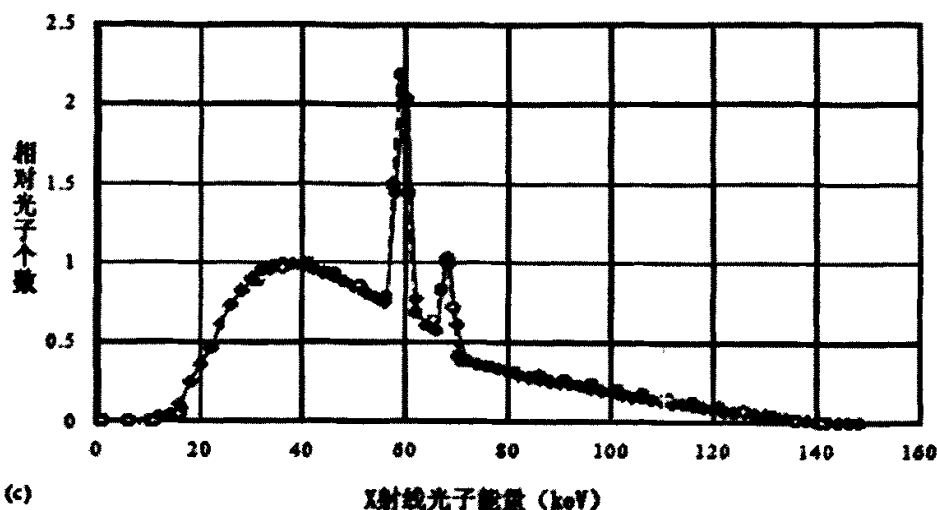


图 2-2 X 射线光谱图。(a) GE 公司的 Maxray X 射线管；(b) Pentax 公司的 X 射线管；(c) Eimax 公司的 X 射线管。(靶极角度均为 12.5°)

2.2 X 射线的透射和散射

2.2.1 X 射线的穿透作用

X 射线能够穿透一般可见光不能穿透的物质。可见光波长比较长，因此可见光的光子所具有的能量较小。当可见光照射到物体上后，一部分光子被反射，大部分光子被物质吸收，所以可见光不能穿透物体。而 X 射线波长极短，其光子具有很大的能量。当 X 射线照射到物体上时，除了散射和被物质吸收的一部分之外，大部分的光子经物质的原子间隙中通过，因此 X 射线具有很强的穿透性。X 射线的波长越短，光子的能量越大，X 射线的穿透性越强。X 射线的穿透性还与被照物质的等效原子序数和密度等信息有关，X 射线的这种穿透作用是安检应用中透射成像的基础^[23]。

2.2.2 X 线光子与物质的相互作用

当 X 射线照射到物体上时，X 射线的光子与物质会发生一系列的物理作用^[25]。光子与物质碰撞而完全失去其原来携带的能量，即被物质所吸收；光子因为碰撞而改变原来的运行方向，即散射；直接穿过物质的光子即透射。因为物质对 X 射线光子的吸收作用和光子散射作用的存在，X 射线通过物质时会发生不同程度的衰减。

X 射线穿过物质发生的衰减，主要受 X 射线光子与物质的四种相互作用影响：光电效应，瑞利散射，康普顿散射，和电子偶效应。

光电效应是指光子与物质碰撞后，完全失去能量而被原子吸收，同时释放出光电子。吸收了光子的原子由于高能级的电子跃迁，释放出 X 线特征光子。当光子能量在 100keV 范围内的时候，光电效应是最重要的物质吸收光子，即 X 射线衰减的作用。光电效应的横截面积 σ_{pe} ($10^{-24} \text{ cm}^2/\text{atom}$) 是光电效应的影响因子， σ_{pe} 的物理意义是原子的有效横截面积，横截面积越大，则照射的 X 射线光子能与物质的原子发生相互作用的就越多，即 σ_{pe} 表示光电效应发生的概率。

因为实验机型 EI 采用 140keV 的 X 射线源, 因此光电效应对 X 射线衰减的影响是研究需要考虑。当 X 射线源能量几百 keV 范围时, 光电效应的横截面积有如下关系式:

$$\sigma_{pe} \approx 10 \times \frac{Z^{4.5}}{E^3} \quad (2.1)$$

其中 Z 表示物质的原子序数, E 表示光子能量。

瑞利散射是指光子与物质发生弹性碰撞后, 改变了运行方向, 而在整个过程中能量没有损失。瑞利散射的横截面积 σ_R 用表示。因为瑞利散射仅在 X 射线的能量小于 50keV 且对于高 Z 物质的原子才会表现明显, 因此实验研究中忽略瑞利散射对 X 射线衰减的影响。

康普顿散射是指光子与物质发生非弹性碰撞后, 能量损失, 运行方向发生偏移, 并释放出跃变的电子, 该电子即称为康普顿电子。在实验所用的 X 射线能量范围内, 光子的散射主要表现为康普顿散射, 因此 X 射线的衰减也需要考虑该散射作用的影响。

康普顿散射的影响因子用其横截面积 $\sigma_{cs} (10^{-24} \text{ cm}^2/\text{atom})$ 来表示, 并有如下关系式:

$$\sigma_{cs} = 0.665 \times Z \quad (2.2)$$

其中 Z 为物质的原子序数。

电子偶效应是指在与物质碰撞后, X 射线光子消失, 被一对电子代替。电子偶效应只有当 X 射线能量大于 1.022MeV 时才会发生作用, 因此实验中也不予考虑。

2.2.3 X 射线的衰减

物质原子的横截面积 σ 代表 X 射线照射物体时, 光子与原子发生作用的概率。对于每一个 X 射线光子的能量而言, σ 主要由光电效应, 瑞利散射和康普顿散射三种横截面积组成。基于我们实验中忽略瑞利散射作用, σ 有如下关系式:

$$\sigma = \sigma_{pe} + \sigma_{cs} \quad (2.3)$$

当入射强度为 I_0 的 X 射线照射到厚度为 x 的物体上时, 如图 2-3 所示,

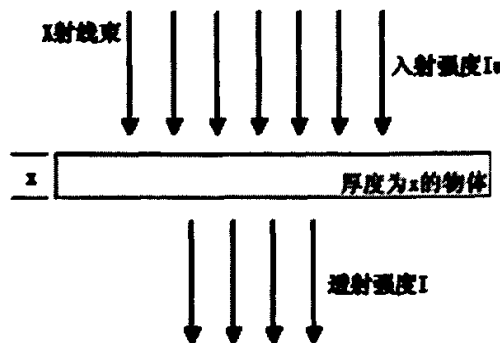


图 2-3 X 射线透射示意图

穿过物体的 X 射线的透射强度 I 有如下关系式:

$$I = I_0 \times e^{-\sigma n x} \quad (2.4)$$

式中 σ 为原子的截面面积, n 为单位体积内的原子数, x 为物体物质厚度。

其中单位体积内的原子数 n 又可以表示为:

$$n = \frac{N \times \rho}{A} \quad (2.5)$$

N 为 Avogadro 常数, $N=6.02252 \times 10^{23}$ atom/mole, ρ 为物质密度, A 为原子的摩尔质量。

由 (2.3), (2.4) 和 (2.5) 三式得:

$$I = I_0 \times e^{-\sigma(Z,E) \frac{N\rho}{A} x} \quad (2.6)$$

式 (2.6) 给出了 X 射线的衰减方程。从式中可以看出, 在 X 射线能量一定的情况下, 具体影响 X 射线衰减的因素是物质的原子序数 Z (或混合物的等效原子序数 Z_{eff})、物质的密度 ρ 和物体的厚度 x 。

物质对于 X 射线的线性吸收系数 μ 可以表示为:

$$\mu = \sigma \times n = \sigma \times \frac{N\rho}{A} \quad (2.7)$$

代入式 (2.6) 得^[26]:

$$I = I_0 \times e^{-\mu x} \quad (2.8)$$

因此有:

$$\mu x = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (2.9)$$

因为对于任何物质而言, 不管其处于什么状态, 比值 μ/ρ 都是一个定值, 是物质特征的一种体现。 μ/ρ 称为物质的质量吸收系数, 用 μ_m 表示, 即:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \sigma(Z,E) \times \frac{N}{A} \quad (2.10)$$

代入式 (2.9) 得:

$$\mu_m \rho x = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (2.11)$$

式 (2.11) 是 X 射线透射系统物质属性判别的重要理论公式。

2.3 本章小结

本章主要介绍 X 线透射成像的基本原理。首先介绍了 X 射线产生的原理以及其光谱特性，其次介绍了 X 线的透射和散射，以及简述了其成像的理论基础。

第三章 实验系统的硬件与软件结构

3.1 伪双能系统探测器及信号采集

实验系统中采用的 X 射线探测器为闪烁晶体探测器^[19]。其结构如图 3-1 所示。闪烁晶体是指一大类在放射线或原子核粒子作用下发生闪光现象的晶体材料。当高能 X 射线照射到闪烁晶体制成的探测器上后, 闪烁晶体便发出荧光, 照射的 X 射线强度越大, 闪烁晶体发出的荧光就越强, 这些荧光被系统中的光电转换模块接受并转化为电信号, 经过硬件电路的 A/D 转换后, 便形成了最终接收到的数字信号。

实验选择 CsI(Tl)作为探测器使用的闪烁晶体。CsI(Tl)闪烁晶体对 X 射线吸收较好, 能量转换效率和分辨率也较高, 可以通过实验控制闪烁晶体的涂层厚度来达到对一定能量的 X 射线光子的最佳吸收效果。并且, 较之其他常用的探测 X 射线的闪烁晶体如 NaI(Tl), CsI(Tl)闪烁晶体还有不易潮解的优点, 最适合在 X 射线透射安检系统中使用。

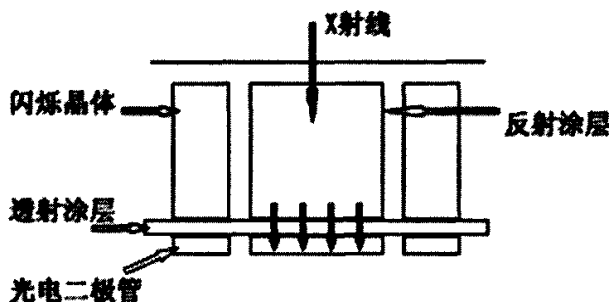


图 3-1 X 射线探测器结构图

如图 3-1 所示^[27], 入射的 X 射线打到探测器中的闪烁晶体上, 使闪烁晶体激发出荧光光子, 荧光光子经反射后, 集中穿过透射涂层打到光电二极管上, 转换成为电信号。

伪双能 X 射线透射系统使用一套发射连续能谱的 X 射线源, 两套不同的探测器, 即响应低能 X 射线的低能探测器和响应高能 X 射线的高能探测器。高低能探测器在结构原理上相同, 不同的是两者上的闪烁晶体涂层的厚度有所差别。不同厚度的闪烁晶体对相应能量范围内的 X 射线吸收更加有效。而真双能系统使用两套发射不同能量级的 X 射线源, 和两套探测器分别获取高低能数据。

因为实验所用的 X 射线源发射的是连续能谱的 X 射线, X 射线的总能量分布在由低到高的各个不同的能级上, 因此发射出的 X 射线既有高能部分, 也有低能部分。首先让低能探测器接收透射的 X 射线, 低能探测器上的闪烁晶体厚度使其能够最大程度地吸收低能部分的 X 射线, 获得透射的低能数据。在低能探测器之后, 夹上一块铜片, 再次过滤漏过的低能 X 射线, 则余下的这部分 X 射线基本上都是透射 X 射线的高能部分。然后再让高能探测器接收这部分高能 X 射线, 获得透射的高能数据。如此一来, 就获得了实验系统物质属性判别所需的高低能两组数据。图 3-2 为伪双能系统探测器的示意图。

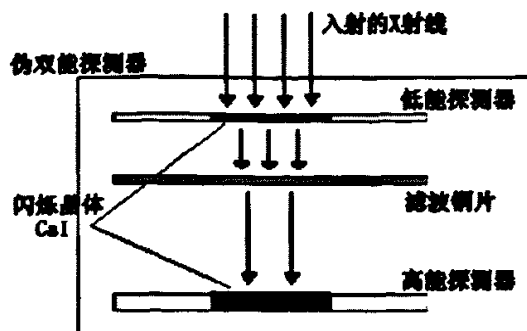


图 3-2 伪双能系统探测器示意图

实验系统中，一块 X 射线探测板上集成 32 个伪双能探测器，由若干块探测板组成一个 L 型的探测器阵列，安置在安检机型的过道的两个面上。目前的安置方向因系统型号的不同有所差别。如下图 3-3 所示：

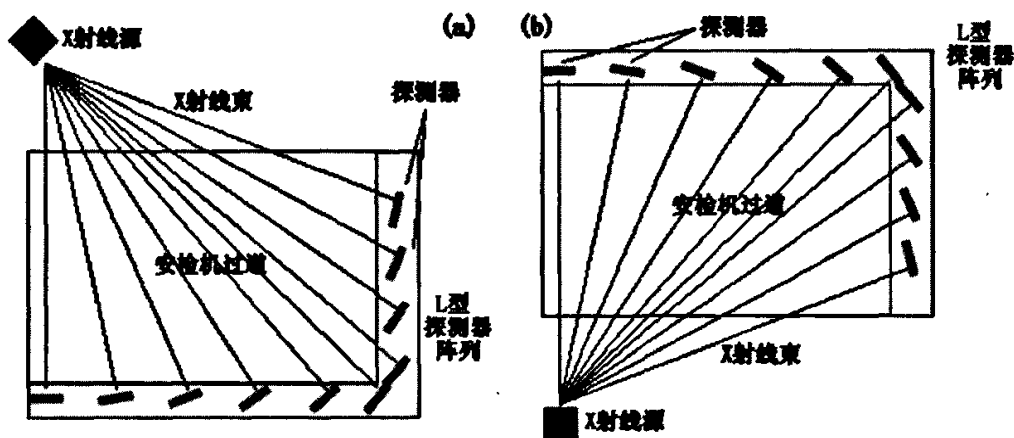


图 3-3 探测器安置方向图。(a) 10080 型号；(b) 6550 型号。

X 射线源发出的 X 线经过过道，自上而下（或自下而上）照射到底面和侧面（或顶面和侧面）的 L 型探测器阵列上。安装在探测盒中的每一块探测板都会因为相应位置的不同，与水平方向偏转一定的角度。这个偏转角度由下面公式给出：

$$\theta = \arctan\left(\frac{d}{H}\right) \quad (3.1)$$

式中 θ 为探测板与水平方向偏转的角度，也就是出射的 X 射线束与垂直方向的夹角； d 为探测板与 X 射线源在该探测板所在平面上投影点的距离； H 为 X 射线源到探测板所在平面的距离。

对于相同型号的透射系统，每一块探测板的偏转角度都是固定不变的。事先计算好这些角度，将每块探测板固定安装在探测器盒中，这样就能保证每块探测板与 X 射线的入射方向都是垂直的，即正对透射的 X 射线，使得探测器吸收 X 线的效率不会收到 X 射线入射角度的不同而发生变化。无论探测器安装在探测盒的哪个位置，其吸收效率应该是相当的。

3.2 透射数据传输模块

3.2.1 计算机通讯接口

计算机的通讯接口有很多种，常用的有并口，串口，USB，红外，蓝牙^[28]，PCI，网络等等。这些常用的计算机通讯接口的传输速率^{[29][30]}如表 3.1 所示：

表 3.1 常用通讯接口的传输速率

通讯接口	理论传输速率
并口	300 KByte/s
串口	约 115 Kbit/s
USB1.1	12 Mbit/s（全速）/1.5 Mbit/s（低速）
USB2.0	480 Mbit/s
红外	约 115 Kbit/s
蓝牙	432 Kbit/s~721 Kbit/s
PCI(32bit)	132 MByte/s
网络	10/100 Mbit/s

串口是 CPU 与串行设备之间的编码转换器，当数据从串口发送出去的时候，数据字节被转换成串行的位，由接收方串行的位重组成数据字节。串口通讯开发简易，适用于传输数据量不大，并且传输速度要求不是很高的场合。实验系统选择串口作为硬件控制命令的通讯接口。

USB 口是 PC 机与外设的告诉通讯接口之一。其传输速率很高，如表 2.1 中所示，USB1.1 全速可达 12Mbps，而 USB2.0 的传输速率可高达 480Mbps，非常适合对传输时间有较高要求的大数据量的传输；USB 接口统一，使用简单，系统可以自动检测 USB 设备，并对其进行配置，并且 USB 设备可以热拔插，即添加新的 USB 设备系统无需重新启动就可以使用；USB 占用系统资源很少。基于 USB 的以上的优点，实验系统选择 USB 作为透射数据传输的通讯接口。

在 EI 系统的以前版本中，使用的是 USB1.1 通讯接口^[31]。但随着研究技术的发展，探测器的点距减小（原来为 2.54mm，现在为 1.58mm），就是说在相同长度的探测板上可以集成更多的探测器，使得采样图像的分辨率更高更清晰。随之带来的问题就是传输的数据量明显上升，并且对于今后的更大型号的系统开发而言，数据量还会有较大幅度地提高。目前系统的数据量为：

$$Q = 960 \text{（每列探测点数）} \times 4 \text{（每帧数据四列）} \times 2 \text{（高低能两组数据）} \times 2 \text{（一个数据值为 2 个字节）} \\ = 15360 \text{ Bytes} \quad (3.2)$$

对于实时系统，为了让数据更加高效地传输，我们在改进版中采用了 USB2.0 技术进行传输通讯。

3.2.2 USB2.0 传输板

EI 系统中 USB2.0 传输板是以 PHILIPS 的 ISP1581 为核心芯片，基于 USB2.0 协议的告诉通用串行接口。ISP1581 是飞利浦公司的 USB2.0 的接口器件之一，该芯片具有如下特点：

（1）价格低廉，功能完整，完全符合 USB2.0 规范，并且为基于微控制器或微处理器的系统提供高速 USB 通信方案；

（2）支持 USB 系统的自动检测，允许在全速条件下正常工作。通用接口，符合现有大多数期间的分类规格，如通讯器件、打印设备等；

(3) 内部通用 DMA 模块使数据流的集成更加方便。USB 接口标准组件使得开发者可以自由选择微控制器，减少开发成本和缩短开发时间；

(4) 挂起功耗低，满足 USB 电源管理的要求等集成的特性使之易于 PC 外设设备。

USB2.0 传输板与 PC 及外设的连接如图 3-4 所示：

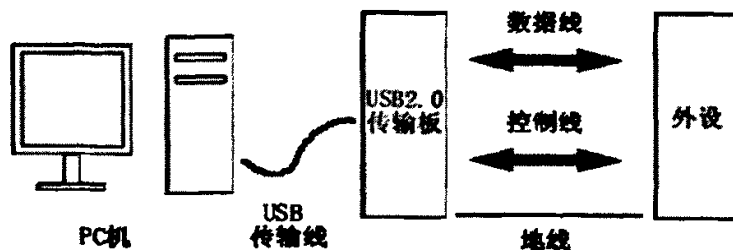


图 3-4 传输板与 PC 及外设连接图

传输板一端通过 USB 连接线与 PC 机的 USB 口相连，另一端通过数据线、控制线、地线和电源线与外部设备（实验系统硬件部分）相连，构成透射数据传输模块。

传输板的主要功能介绍如下：

(1) 支持 USB2.0 系统运作的自动检测。支持 USB1.1 的返回工作模式，允许器件在全速条件下正常工作；

(2) USB2.0 接口板采用 DMA 传输方式，可高速的进行 PC 机和外部设备之间的数据传输。它的实际传输速度可达 8 MByte/s 秒以上；

(3) 传输板的硬件部分提供驱动程序以及 PC 机的功能函数库，便于使用开发 PC 机应用软件，对接收到的数据进行处理；

(4) 传输板有两种供电方式：总线供电和外部设备供电。可通过跳线进行选择。

(5) 有相关的状态指示灯，便于使用识别。包括 POWER 灯，用于指示传输板是否已经供电，灯亮表示已供电。LED-HS 灯，用于指示数据传输是否处于高速状态，灯亮表示已接到高速 USB 口。如果 USB2.0 的设备驱动没有安装或者设备插入的是 USB 低速插口，则该指示灯不亮。LED-RD 灯，灯亮表示传输板正在从外部设备读取数据。LED-WR 灯，灯亮表示传输板正在往外部设备写数据。

3.2.3 传输板的工作原理

USB2.0 传输板由 16 根数据线和 7 根控制线与外部设备（实验系统硬件部分）连接。如图 3-5：

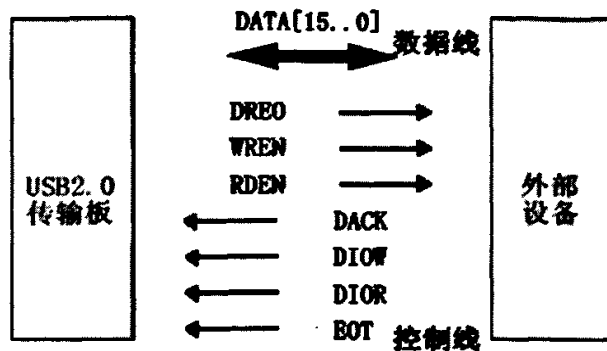


图 3-5 USB2.0 传输板与外设连接图

各个信号线的定义说明如表 3.2 所示：

表 3.2 数据线和控制线的定义说明

信号线	传输方向	定义说明
DATA[15..0]	双向传输	双向数据线 数据双向传送端；推挽输出；5ns 的斜率控制；5V 的最大承受电压
DREQ	输出	DMA 请求，信号传送方向由 USB2.0 接口板到外部设备；推挽输出；5ns 的斜率控制，高电平有效
WREN	输出	写允许信号，信号传送方向由 USB2.0 接口板到外部设备；推挽输出；低电平有效
RDEN	输出	读允许信号，信号传送方向由 USB2.0 接口板到外部设备；推挽输出；低电平有效
DACK	输入	DMA 应答，信号传送方向由外部设备到 USB2.0 接口板；5V 的最大承受电压；低电平有效
DIOR	输入	DMA 读选通信号。信号传送方向由外部设备到 USB2.0 接口板；5V 的最大承受电压；低电平有效
DIOW	输入	DMA 写选通信号。信号传送方向由外部设备到 USB2.0 接口板；5V 的最大承受电压；低电平有效
EOT	输入	传送终止信号。信号传送方向由外部设备到 USB2.0 接口板；5V 的最大承受电压；高电平有效

传输板使用 5V 稳定外部电压供电。

数据传输的过程为：首先系统 PC 机软件发送请求，要求启动数据传输。USB2.0 传输板接到上位机的请求后，置 DREQ 信号为有效。外部设备查询到 DREQ 信号有效后，便发送 DACK 确认信号。然后查询 RDEN 信号还是 WREN 信号有效，确定要进行的操作是读数据还是写数据。接着输出读或者写的选通控制信号，在选通信号的有效时间内将数据从 PC 机发送到外设，或者将外部设备的数据传送到 PC 机上。数据传输过程是由 PC 机软件发起建立的。PC 机首先要指定传输的数据量的大小（字节数）。当数据传输完毕，或者从外部设备输过来一个 EOT 有效信号时，传输过程结束。

外部设备控制时序如图 3-6 所示：

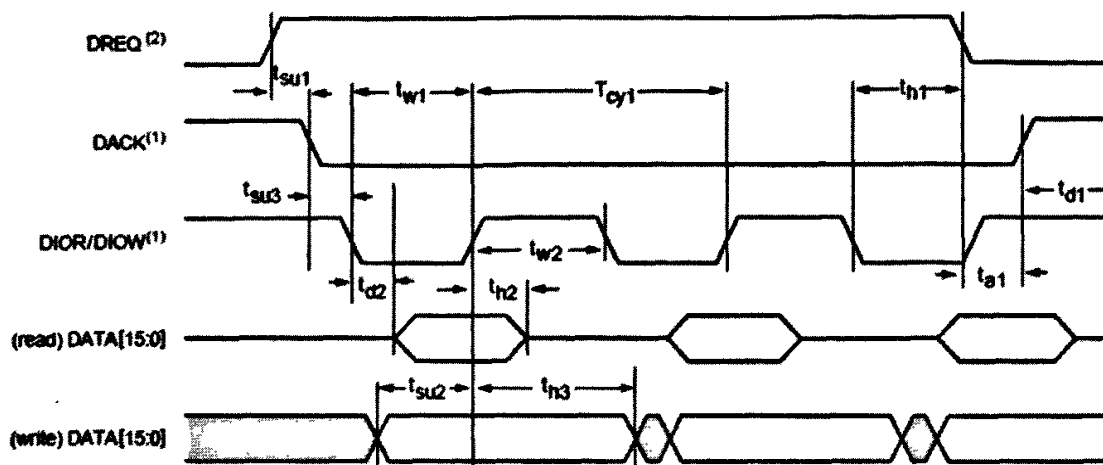


图 3-6 外设控制时序图

3.2.4 传输控制

X 射线源发出的 X 线完整扫描一次 L 型探测盒中的所有探测器，所需的时间是一定的，即采样得到一列完整透射数据的时间是一定的。兼顾考虑实时显示的时间要求和数据传输的效率，EI 系统硬件部分将每产生的 4 列数据打包，并在包之前加上数据包的识别信息头，暂存在硬件数据缓冲中，供 PC 机软件控制读取。我们称这样包括信息头的四列数据包为一帧数据。PC 机通过 USB 口从硬件数据缓冲中，是安帧读取的，即如果本次读取成功，则读到的数据量为四列高低能数据的大小加上信息头（帧头）的大小。帧数据格式如下：

帧头 | 高能值 | 低能值 | 高能值 | 低能值 | 高能值 | 低能值 (数据区)

帧头为 0x00~0x09，10 个字节的连续值，用来判断传输的数据量的正误，以及定位帧数据的位置。如果两个帧头之间的数据量小于四列高低能数据的大小，则前一个帧头所属的这帧数据在传输过程中发生错误，该帧数据被丢弃。如果发生数据丢帧的情况，实习显示的图像就会不完整，因此数据传输模块对硬件的稳定性要求较高。而 USB 通讯口的自动检测功能，恰好为连接的稳定性提供一个判断和纠错的方法。

帧数据区的数据为四列高低能数据的连续排列。其中高能值和低能值相间隔排列，每一组高能值和随后的低能值都对应一个伪双能探测器上接收到的高能和低能数据。因为硬件部分使用的是 12 位的 A/D 转换器，为了传输方便，每一个数据值都是 WORD 型的，占用 2 个字节。因此根据 (3.2) 式，一帧完整数据的大小为 15370 个字节。

而根据采样定律^[32]，PC 机访问 USB 口读取帧数据的时间间隔，小于一帧完整数据的硬件采样时间的 1/2。在相邻两帧数据的硬件采样时间间隔之内，PC 机软件要完成数据接收，处理，拼接成图像，显示等功能。这样的实时系统对每一个模块的耗时时间要求都非常严格。

在 ISP1581 芯片提供的硬件驱动函数库中，涉及到数据传输控制的主要有以下四个函数：

1. int_stdcall Ex_Vender_Read(unsigned char version);

此函数功能为请求读取函数，读取驱动版本号。并且此函数也用于检查 USB2.0 接口板是否连接，返回值为 21H，则表示已经连接上；

2. int_stdcall Ex_Vender_E2prom(unsigned char code, unsigned char offset, int length);

此函数功能为发送要求从读取管道以中断传输方式进行数据传输的请求。发送此请求后，可在读取管

道读取一个数据,若数据为 0x55,则表示外设没有准备好数据;若数据为 0x88,则表示外设已经准备好数据,可以读取。

3. `int_stdcall Ex_ReadData(int pipenum,unsigned char *recbuffer,int len,int waittime);`

此函数功能为从 USB 口读取指定大小的数据量。

4. `int_stdcall Ex_Vender_ScanOrPrint(unsigned char code ,int length);`

此函数功能为发送大批量读取或写入数据的请求。

图 3-7 为 PC 机软件控制的数据传输的具体流程:

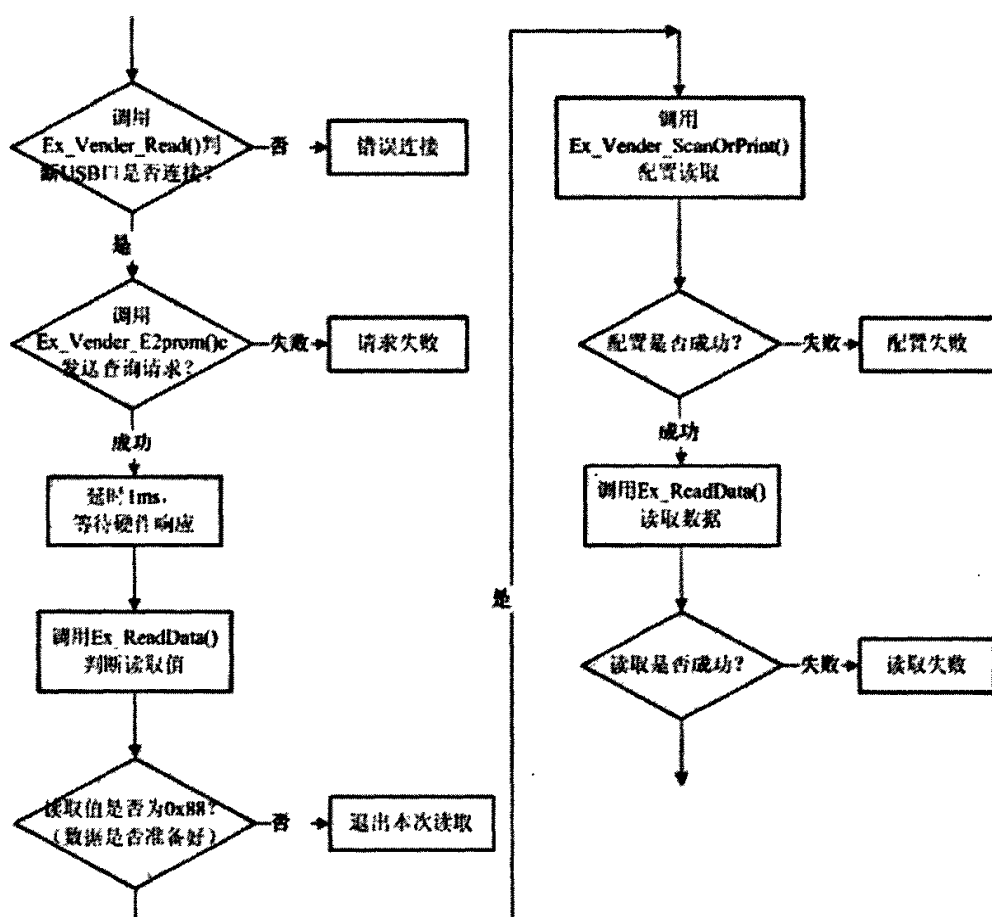


图 3-7 数据传输控制流程图

实验系统中,外部设备的一些参数也是可以由 PC 机软件灵活地进行配置修改的。如传输的探测器采样点数和双能数据与单能数据的切换等。软件在系统首次开机时,通过控制协议对不同型号的安检系统进行配置,配置成功后信息即存入硬件缓冲中,断电后不会消失。配置外部设备的硬件参数也是通过 USB 口传输控制帧完成的。控制帧同样采用帧头加帧数据的格式。具体控制帧协议如表 3.3 所示:

表 3.3 控制帧协议

帧名称	作用	帧头	帧数据	返回值
发送配置	PC 机软件 配置硬件	0xAAAA 0xAAAA	第一个字为传输的采样点数； 第二个字为单双能识别 (0x0085 为双能, 0x0045 为单 能)； 第三个字为预留 0xAAAA。	第一个字为正误判别 字 (0x0005 为错误返 回; 0xAAAA 为正确 返回) 第二个字为传输的采 样点数； 第三个字为单双能识 别 (0x0085 为双能, 0x0045 为单能)； 第四个字为预留 0xAAAA。
获取配置	PC 机软件获 取配置硬件	0x5555 0x5555	0xFAFA 0xFAFA 0xFAFA	

整个透射数据采集、传输和拼接的过程如图 3-8 所示：

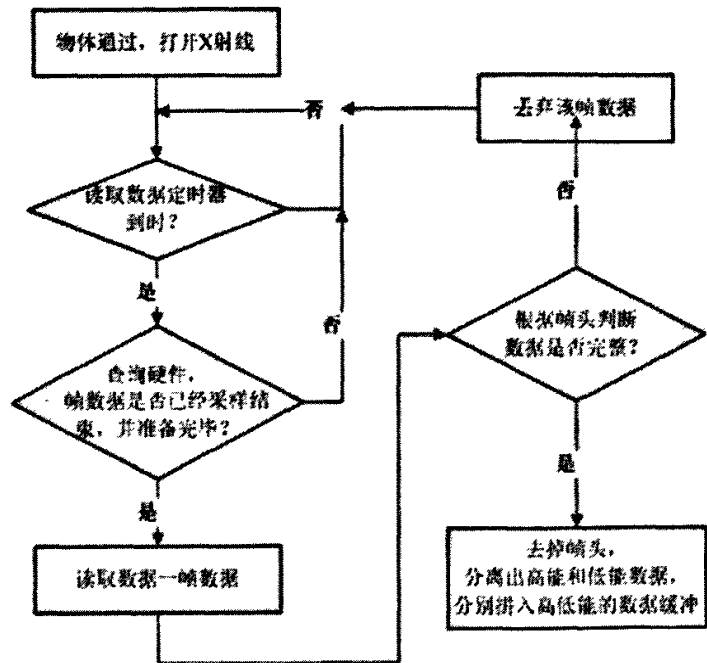


图 3-8 数据采集传输和拼接流程图

3.3 原始数据处理及管理

3.3.1 消除探测器的动态范围差异

实验机型采用的 A/D 转换器是 12bit，因此理论上测得的透射数据的值的范围在 0~4095 之间。当 X 射线源关闭时，即探测器没有接收任何 X 射线光子，此时理论上探测到的透射数据值应该为零。但是由于系统所用探测器的制造材料和技术工艺的的缘故，使得实际所测得的结果并不为零，而是根据探测器的不同，在几百这样一个数值范围内^{[33][34]}。其中对于同一个探测器而言，这个值的浮动范围是比较小的，在 50 左

右（这个值也就是系统硬件电路部分的综合噪声的大小）。我们称在 X 射线源关闭的情况下，探测器测得的数值为本底值 I_z 。

当 X 射线源打开，并且没有任何物体遮挡在探测器前面的时候，我们把接收到的数据值称为满度值 I_f 。满度值就是当探测器吸收 X 射线光子达到饱和时，测得的数据值。

对于一个探测器，其满度值与本底值以及两者的差 ($I_f - I_z$) 称为该探测器的测量的动态范围。每一个探测器由于其制造材料和工艺的细微差别，动态范围都不相同。如果直接将探测器测得的数据显示出来，那么图像上会有明暗相隔的横状条纹，如图 3-9 所示，这就是不同探测器的动态范围差异产生的影响。

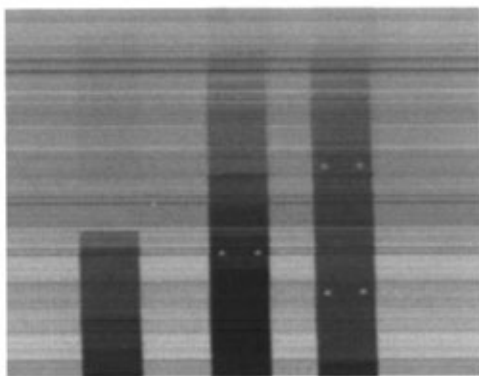


图 3-9 探测器的动态范围差异影响图

图中图像从左到右依次为有机物、无机物和混合物的阶梯型标准块。可以看出，由于横向条纹的干扰，阶梯型标准块的台阶都很难分辨清楚，更不用说复杂的行李包裹。因此校正工作是必要的。

要校正探测器的动态范围差异，方法就是将不同探测器的动态范围映射到同一个变化范围内。基于 12bit 的模数转换，透射数据值的理论范围为 0~4095，我们把不同探测器的动态范围统一校正到 0~4095 这样一个 4096 级灰度的范围内。采用一段线性灰度映射^[35]的方法，有如下的关系式：

$$\frac{I_x - I_z}{I_f - I_z} = \frac{I_y - 0}{4095} \quad (3.3)$$

因此校正公式为：

$$I_y = \frac{I_x - I_z}{I_f - I_z} \times 4095 = \alpha \times (I_x - I_z) \quad (3.4)$$

式 (3.3) 和 (3.4) 中， I_f 和 I_z 分别为该探测器的满度值和本底值， I_x 为探测器实际测得的值， I_y 为映射校正后的值。其中系数 α 称为该探测器的动态范围校正系数，

$$\alpha = \frac{1}{I_f - I_z} \times 4095 \quad (3.5)$$

对于每一个探测器，实验系统在初始化的时候都会计算它的动态范围校正系数 α ，并且在系统运行过

程中始终保存 α 和 I_z 值。当有物体通过，系统采集数据时，把探测器实际测得的数据值代入式 (3.4) 中实时处理，并实时显示出来，下图为图 3-9 的数据经过动态范围校正之后的图像：

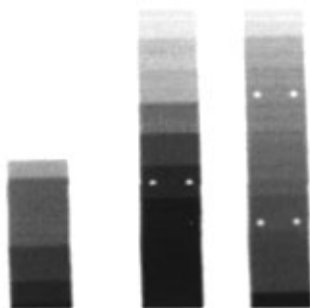


图 3-10 动态范围校正图

如上图所示，数据校正后的图像中的背景很干净，没有横状的明暗条纹的干扰。有机物、无机物和混合物标准块的阶梯状台阶已经能够比较清楚的分辨出来了。

3.3.2 探测点的弧线缩选

EI 系统显示器的显示分辨率是 1028×768 。由于 PC 机的软件主程序的人机交互界面需要占据屏幕的一部分空间，因此透射数据图像的显示窗口纵向高度为 700。而系统安置的探测器个数为 960，屏幕上显示的一个像素点的只能对应一个探测器的值，因此从探测器接收到的数据点数，必须通过压缩选择，点数缩小到 700 后，才能在图像窗口中正常显示。

因为一组探测器的数据包括高低能两个值，并且该点的物质属性值是根据这两个值计算出来的，因此为了不混淆该点的物质属性值，不能使用高低能数值分别插值计算的方法来缩小选择的点数。被选择的点的高低能数据必须是探测器的原始数据。因此对于纵向的 960 点的数据，我们采用选择 700 个用于显示，剩下点的数据不予以显示的方法。

而选择显示的这些探测点，必须符合以下几个要求：

(1) 这 700 个探测点的选择范围，要最大可能地覆盖到全部数据。即不能只集中选择某一个区域内的探测点（如 100~800 点的数据），而是从 0~960 范围内的探测点都要有所涉及；

(2) 因为 0~960 范围中部的探测点的数据通常拥有最多的物质信息（行李包裹一般放在系统机型过道的中央），而范围两端的探测点的数据所含的信息比较少（除了一些非常大的行李包裹能够遮挡住全部的探测器，一般的物体基于其大小关系，都不会遮挡住范围两端的探测器，即范围两端的探测器在大多数的情况下，都处于满度状态），因此选择显示的探测点需要较多地保留范围中部的探测点，而两端的探测点可以忽略得比较多；

(3) 被选择的探测点的数据在屏幕上显示出来的图像，在边缘处的过渡应当比较平滑，而不能出现上下“断层”的现象，如图 3-11 所示。即原探测点中，被选择的相邻探测点的距离变化应当比较平滑，不能出现大的跳变。例如：缩选探测点时，对于原探测点，隔 2 点取一点，再隔 3 点取一点，再隔 4 点取一点……这种方案是可以被接收的，而隔 2 点取一点，隔 3 点取一点，隔 10 点取一点，这样相邻点选择的

距离发生较大跳变的方案，势必会造成最后显示图像上的“断层”。

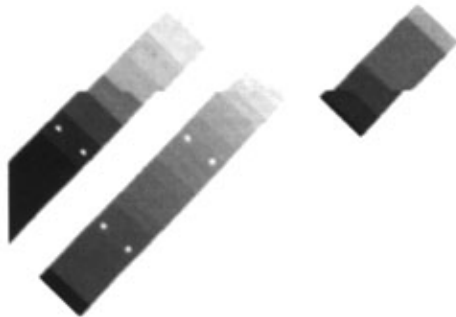


图 3-11 图像“断层”现象

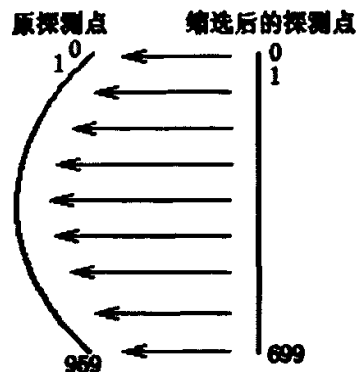


图 3-12 弧线筛选示意图

基于上述 3 点要求，我们采用一种弧线筛选的方法来选取要显示的探测点。这种算法的基本思想是：构造一条长度为 960 的弧线，把原探测点看作均匀分布在这条弧线上。筛选后的探测点，看作均匀分布在一条长度为 700 的直线上。如图 3-12 所示。则整个筛选的过程就是分别将直线上的探测点映射到弧线上，映射所得到的弧线上的点的序号，就是原探测点中所要选取的点的序号。

该算法最为关键的一步就是如何构造这样的一条弧线。我们用数组 $Z[m]$ 和 $H[n]$ 来分别表示直线上的点的序号和弧线上点的序号 ($m: 0 \sim 699, n: 0 \sim 959$)。从图 2.15 上我们可以看出，直线的中点即 $Z[350]$ 应当对应于弧线的中点 $H[480]$ ，直线的两个端点 $Z[0]$ 和 $Z[699]$ 分别对应于弧线上的 $H[0]$ 和 $H[959]$ 探测点。以两个中点为基准点，下面的半部分中，映射点的序号关系是与弧线上每一点的斜率相关的。直线上的点映射到弧线上点的斜率越大（弧线的下半部分斜率取负值），则该映射点与前一个映射点之间的距离也越大。从基准点往下，由于弧线的斜率不断地增大，直线上的点映射到弧线上点的序号之间的距离也不断地增大。从基准点往下和往上的变化规律是相同的。因此我们可以假设存在这样一个 Δ 值，它表示映射点之间的距离的增长幅度， Δ 是随着映射点的斜率增大而增大的。为了计算方便，我们设 Δ 是呈倍数关系增长的，直线上的点映射到弧线上点的序号关系有：

$$\left. \begin{aligned} Z[350] &\dots\dots\dots H[480] \\ Z[351] &\dots\dots\dots H[480+(1+0 \times \Delta)] \\ Z[352] &\dots\dots\dots H[480+(1+1 \times \Delta)] \\ Z[353] &\dots\dots\dots H[480+(1+2 \times \Delta)] \\ &\dots\dots\dots \\ Z[699] &\dots\dots\dots H[480+(1+(350-2) \times \Delta)] = H[959] \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

弧线的长度是已知的，根据以上规律有：

$$(1+0 \times \Delta) + (1+1 \times \Delta) + (1+2 \times \Delta) + \dots + (1+(350-2) \times \Delta) = \frac{960}{2} \quad (3.7)$$

式 (3.7) 是一个算术级数^[36]的求和，根据算术级数的求和公式有：

$$(350-1) + (0 \times \Delta + (350-2) \times \Delta) \times \frac{(350-1)}{2} = \frac{960}{2} \quad (3.8)$$

由此可以计算出 $\Delta \approx 0.002$ 。

将 Δ 值代入到式(3.6)中就可以求出从基准点往下的点 Z[351]到 Z[699]在弧线上的映射探测点的序号。从基准点往上的部分,其变化规律和往下是相同的,即计算出来的 Δ 值同样可以应用到上半部分的映射点序号的计算。不同之处只是在于将式(3.6)右半部分映射点的序号计算中,基准点序号后的“+”改为“-”。

3.3.3 数据管理

从探测器接收到的透射数据经过简单的处理之后,存入系统的数据管理模块中。数据管理模块是开辟的一块较大的缓冲区域,统一管理数据的相关操作。其它各个需要数据的模块,如源数据存入模块,数据处理模块,数据显示模块,数据存档模块等,均从这个数据管理模块中写入或者读取数据。各个模块对管理模块中的数据的操作,均是通过其提供的相应的操作指针来进行的。

数据管理模块所开辟的空间类似与一个循环链表,只不过这个链表的每个节点的地址空间是连续的。当有新数据要存入时,管理模块会寻找空余的空间存入数据,如果整个区域已经被填满,则管理模块会覆盖最老的数据以存入新的数据。存入操作指针 pStore 能够完成寻找空间的工作。在 pStore 之后,有数据处理指针 pProcess,负责读取存入数据中仍未经过处理的部分,交给处理模块。在 pProcess 之后,有数据显示指针 pShow,负责将处理完毕的数据取出送至显示模块显示。当一个包的动态显示结束之后,有数据存档指针 pSave 将当前这个包的数据存入硬盘。各个操作指针之间有严格的相互关系,如 pProcess 指针不能超越 pStore 指针的位置, pShow 指针不能超越 pProcess 指针,这些关系均由模块统一管理。如图 3-13 所示:

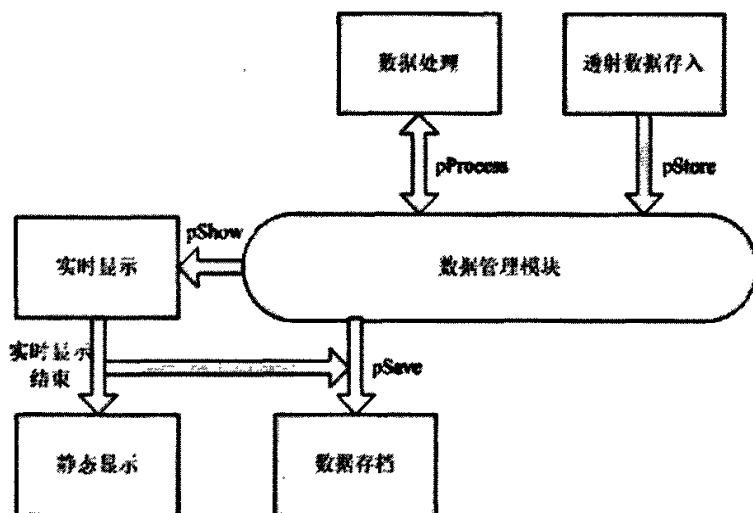


图 3-13 数据管理模块示意图

数据管理模块使得整个系统对数据的操作分工非常清晰,便于实验系统的流畅运行和数据的研究。

3.4 本章小结

本章主要基于本文研究采用的实验模型——EI 安检设备,介绍了伪双能系统的探测器及其探测信号的采集技术。随后介绍了基于 USB2.0 的透射信号数据传输模块,包括其工作原理和控制流程。最后概述了软件中的原始数据处理部分所采用的消除探测器的动态范围差异和探测点数据选择的算法,以及数据管理部分的流程。

第四章 校正厚度影响的物质属性判别方法

4.1 双能系统物质属性判别的传统方法

4.1.1 物质属性的 R 值判据

由式 (2.11) 我们已经得到了在 X 射线源为单色谱的双能系统中, 物质的质量吸收系数 μ_m 、物质的密度 ρ 、物质的厚度 x 与射线出射强度 I_0 和透射强度 I 的关系。在实际计算中, 原式的射线出射强度 I_0 可以用探测器的满度值 I_f 代替, 而透射强度值 I 可以用探测器的实测值经过校正动态范围后的值 I_y 代替。则式 (2.11) 变为:

$$\mu_m \rho x = \ln\left(\frac{I_f}{I_y}\right) \quad (4.1)$$

双能系统有高低能两组数据, 参照式 (4.1), 对于高能数据和低能数据分别有:

$$\left. \begin{aligned} \mu_{hm} \rho x &= \ln\left(\frac{I_{hf}}{I_{hy}}\right) \\ \mu_{lm} \rho x &= \ln\left(\frac{I_{lf}}{I_{ly}}\right) \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

式中的 μ_{hm} 和 μ_{lm} 分别为高低能量的 X 射线下, 对应的物质质量吸收系数, I_{hf} 和 I_{lf} 、以及 I_{hy} 和 I_{ly} 分别为对应的高低能探测器的满度值和实测值。

我们定义物质属性值 R 为:

$$R = \frac{\mu_{lm}}{\mu_{hm}} = \frac{\mu_{lm} \rho x}{\mu_{hm} \rho x} = \frac{\ln(I_{lf} / I_{ly})}{\ln(I_{hf} / I_{hy})} \quad (4.3)$$

因为, 对于高低能数据, 都符合式 (2.10), 即:

$$\left. \begin{aligned} \mu_{hm} &= \frac{\mu}{\rho} = \sigma(Z, E_h) \times \frac{N}{A} \\ \mu_{lm} &= \frac{\mu}{\rho} = \sigma(Z, E_l) \times \frac{N}{A} \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

结合式 (4.3) 和 (4.4) 我们可以看出:

$$R = \frac{\mu_{lm}}{\mu_{hm}} = \frac{\ln(I_{lf} / I_{ly})}{\ln(I_{hf} / I_{hy})} = \frac{\sigma(Z, E_l)}{\sigma(Z, E_h)} \quad (4.5)$$

即在单色谱 X 射线源的双能系统中, 由式 (4.3) 计算出来的 R 值, 不会受到被照物体厚度因子 x 的影响, 而只与被照物质的原子序数 Z 有关, 因此这个 R 值可以作为判别物质属性的一个判据。

在其它一些的 X 射线双能透射系统的物质属性判别的计算方法上^[37], 将物质属性值定义为 $R' = \frac{\mu_{hm}}{\mu_{lm}}$ 。

而在我们的伪双能系统中, 将 R 值定义为 μ_{lm} / μ_{hm} , 即 R' 的倒数, 是为了属性的计算和区分的方便。因为对于伪双能系统而言, 探测器的构造是低能探测器在上面, 中间隔一块滤波铜片, 下面再安置高能探测器, 由于高能探测器之前有低能探测器和滤波铜片, 所以对于大多数原子序数 Z 略大的物质而言, 其测得的低能数据值都要大于高能数据值, 因此这些物质计算出来的 R 值会大于 1。而如果取 $R' = \frac{\mu_{hm}}{\mu_{lm}}$ 为物质属性的话, 则大多数同样的物质的属性值 R' 会在 0~1 这个区间内。为了使物质属性值落在的区别更加分散, 更加易于区分不同的物质, 因此在这里, 我们选择 R' 的倒数 R 作为物质判别的属性值。

4.1.2 物体的等效原子序数

式 (4.5) 为物质属性的计算公式, 从中我们能够看出 $R \propto Z$, 即 R 是能够反映物质原子序数的一个值。这里的物质指的是单一的物质, 即由同一种元素构成的纯物质, Z 指的是构成这种纯物质的原子的序数值。但是在实际应用过程中, 绝大多数的物质的不是纯物质, 而是几种或很多种元素构成的化合物。因此在应用中, 我们所称的物质属性, 是指作为化合物的物品的属性, 是属于有机物、无机物还是混合物。公式当中的 Z 应该由化合物的等效原子序数 Z_{eff} 来代替^{[38][39]}。

$$R = \frac{\mu_{lm}}{\mu_{hm}} = \frac{\ln(I_{lf} / I_{ly})}{\ln(I_{hf} / I_{hy})} = \frac{\sigma(Z_{eff}, E_l)}{\sigma(Z_{eff}, E_h)} \quad (4.6)$$

目前计算化合物的等效原子序数有一些方法, 不同的方法各自对等效原子序数的物理定义略有一些差别。但就整体而言, 只是不同方法之间的计算复杂度和结果精度略有不同。下面介绍其中的一种方法。

假设某物体是一种由 n 种原子所构成的化合物, 则先由下面的公式计算出这 n 种原子中, 第 i 种原子的质量电子密度 $N_{s,i}$

$$N_{s,i} = \frac{N_A \omega_i Z_i}{M_i}, \text{ 其中 } i: 1 \sim n \quad (4.7)$$

式中 N_A 为 Avogadro 常数, ω_i 为该原子在整个元素原子中所占的比例, Z_i 为该原子的原子序数, M_i 为该原子的原子质量

物体整个有效质量电子密度为:

$$N_s = \sum_{i=1}^n N_{s,i} \quad (4.8)$$

则物体的等效原子序数为:

$$Z_{eff} = (m-1) \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i Z_i^{(m-1)})} \quad (4.9)$$

式中 $a_i = N_{g,i}/N_g$ 为该种电子所占的质量电子密度比例; m 为一常数, 其具体取值依据物体的成分和照射的 X 射线光子的能量, 一般取 3.0~5.0 之间。

$R \propto Z_{eff}$, 反映了物体(化合物)的物质属性。在安检行业标准中, 除去爆炸物和毒品等一些特定的高危物体, 将所有的被检物体分为三类——有机物、混合物和无机物。这三种物质的等效原子序数关系如下:

$$Z_{eff}(\text{有机物}) < Z_{eff}(\text{混合物}) < Z_{eff}(\text{无机物})$$

因此, 通过式 (3.1.3) 计算出来的三种物质的 R 值有:

$$R(\text{有机物}) < R(\text{混合物}) < R(\text{无机物})$$

在物体检测标准中, 分别使用阶梯型的有机玻璃 (O_g)、铝块 (Al) 和铁块 (Fe) 作为三种物质区分的检测标准块。

另外, 在双能 X 线透射系统的真彩色图像中, 要求分别将有机物、混合物和无机物着成橙色、绿色和蓝色三种不同的颜色, 使得检查人员能够通过真彩色图像, 直观快捷地判断出被检物体的物质属性。下图是一张德国海曼公司生产的双能 X 射线透射系统的行李箱检测的真彩色图像:

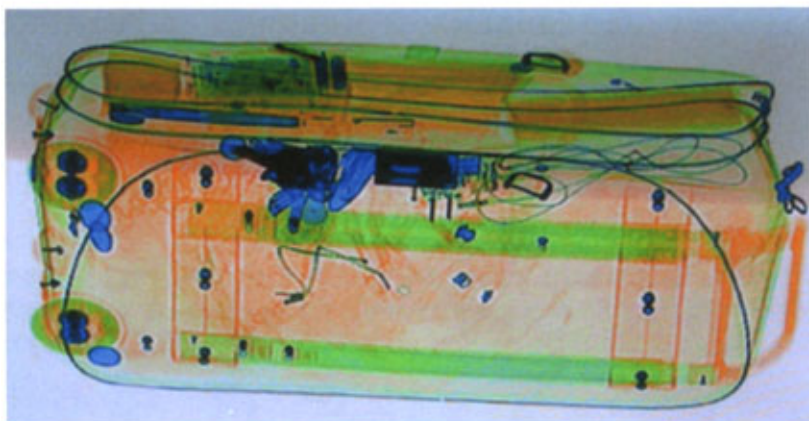


图 4-1 海曼系统的行李箱图像

如图 4-1 所示, 图像中的无机物物体或部件, 如滑轮、金属盒等着为蓝色, 近似与铝的材料所制的行李箱的拉杆着为绿色, 而一些等效原子序数较小的, 属于有机物的人造纤维或纸张等, 被着为橙色。

由图我们可以看出, 行李物品的物质属性判别的准确性和精确度, 与系统真彩色图像的显示质量是紧密相关的。属性计算的准确性, 会直接影响到物体的着色, 从而影响物质判别的正误; 而计算的精确度会影响色彩的过渡。根据更加准确的物质属性着色, 和更加丰富图像的层次感, 能够帮助检测人员更加准确便捷地判别物体。因此要提高系统真彩色图像的显示质量, 必须从提高物质属性值的准确性和精确度入手。

4.2 连续能谱 X 射线的厚度效应

对于单色谱 X 射线源的双能系统而言, 物质属性值 R 的计算方法已经由式 (4.3) 给出。但在实际应用中, 由于 X 射线源的制造技术和系统成本的限制, 双能系统通常采用的是连续能谱的 X 射线源。

即 X 射线源发射的 X 线并不是一个单一的能量级，而是其能量分别分布在一条连续的谱线上，如 2.1.2 节介绍的那样。

单色谱 X 射线的衰减公式已经由式 (2.8) 给出。而连续能谱 X 射线的衰减公式^[40]较之更为复杂一些：

$$I = \int_0^{E_m} S_k(E) \times e^{-\mu(E,Z)x} dE \quad (4.10)$$

式中 $S_k(E) = N(E) * P(E) * E$, ($k \in [0, E_m]$)，其中 $N(E)$ 为 X 射线连续谱中该能级的光子数， $P(E)$ 为探测器在光子能量为 E 时的探测效率， E 为光子能量； $\mu(E, Z)$ 为该种物质在能量为 E 的 X 射线下的质量吸收系数， x 为物体厚度， I 为探测器接收到的透射数据值。

则对于高低能探测器分别有：

$$\left. \begin{aligned} I_h &= \int_0^{E_h} S_{hk}(E) \times e^{-\mu_k(E,Z)x} dE \\ I_l &= \int_0^{E_l} S_{lk}(E) \times e^{-\mu_k(E,Z)x} dE \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

且当物体厚度为零时 ($x=0$)，即没有物体遮挡，探测器测得透射数据值就是 X 射线源的出射强度，也就是满度值：

$$\left. \begin{aligned} I_{hf} &= \int_0^{E_h} S_{hk}(E) dE \\ I_{lf} &= \int_0^{E_l} S_{lk}(E) dE \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

由于系统的 X 射线源产生的是连续谱的关系，无法象单色谱 X 射线源那样直接由高低能的衰减公式公式推导出物质的属性值。但是我们可以参照单色谱的 R 值计算公式，将连续谱近似为某个等效的单色谱，由此得到近似下的等效 R_c 值计算公式：

$$R_c = \frac{\ln(I_f / I_l)}{\ln(I_{hf} / I_{hl})} \quad (4.13)$$

因为公式中存在能量积分的关系，所以式 (4.13) 中无法象单色谱公式那样，通过取自然对数然后将高低能值相除来消去物体厚度因子 x ，因此采用该公式计算物质属性值，在计算简化的同时，会引入物体厚度的不同对属性值计算结果的影响。这就是连续能谱 X 射线仍双能系统中，物质判别的厚度影响。

物体的厚度影响在实验中表现为，当被测物体的厚度发生变化时，高低能数据值也将发生较大的变化。如有机物标准块台阶数不断减小的同时，其用式 (4.13) 计算出来的物质属性值 R_c 在不断地增大。而使得厚度较薄的有机玻璃标准块的 R_c 值与厚度较厚的铝标准块的 R_c 值发生了重叠，厚度较薄铝标准块与厚度较厚的铁标准块也存在这样的问题。这样就会导致两种情况的发生：一是相同的物质由于厚度不同，其 R_c 值也不同，或者说其 R_c 值分布的范围很大；二是不同物质由于厚度不同，其 R_c 值有可能相同，就如上面所说的情况。厚度效应使得物质判别的准确性下降。

图 4-2 为厚度效应现象图，图中可以看出，不同标准块之间由于厚度不同，计算出来的 R_c 值已经发生了重叠，影响了物质判别。

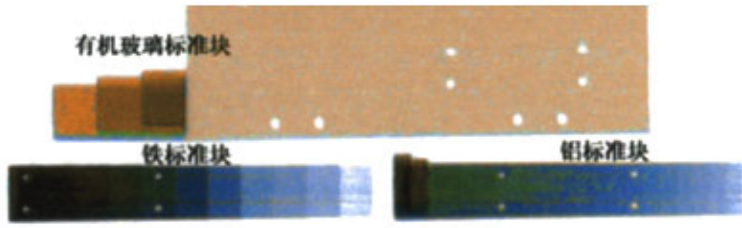


图 4-2 厚度效应现象图

4.3 校正厚度影响的属性判别方法

4.3.1 数值积分的方法

消除厚度影响的数值积分的方法在前人的研究工作中已经被使用过^{[41][42][43]}，这是一种利用数值积分，求最优解的方法。现简述如下。

由式 (4.10) 得知连续能谱下的 X 射线衰减公式是一个定积分公式。又有定积分的定义^[44]为：

$$\int_a^b f(x)dx = \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \max|\Delta x_k| \rightarrow 0}} \sum_{k=1}^n f(x_k)\Delta x_k \quad (4.14)$$

即将区间 $[a,b]$ 分成 n 个子区间， Δx_k 为其中第 k 个子区间的长度。由此可得定积分的近似计算公式为：

$$\int_a^b f(x)dx \approx \sum_{k=1}^n f(x_k)\Delta x_k \quad (4.15)$$

利用简单的复化求积公式计算定积分的值，常用的公式有梯形公式和 Simpson 公式。

梯形公式为： $\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{2}[f(a)+f(b)]$ ，基于其的复化求积公式为：

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{2}[f(x_0) + 2\sum_{k=1}^{n-1} f(x_k) + f(x_n)] \quad (4.16)$$

， h 为等分 n 份的子区间的长度

Simpson 公式为： $\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{6}[f(a) + 4f(\frac{a+b}{2}) + f(b)]$ ，基于其的复化求积公式为：

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{6}\sum_{k=1}^{n-1}[f(x_{k-1}) + 4f(x_{k-\frac{1}{2}}) + f(x_k)] \quad (4.17)$$

令 $f(E) = S(E)e^{-\mu(E)x}$ ，将 $[0, E_m]$ 区间平均分成长度为 h_E 的 n 个等份， E_k 为分割点， $E_k = m \cdot h_E$ ($m: 0 \sim n-1$)，则式 (4.10) 可以转化为

$$I = \int_0^{E_m} f(E)dE = \int_0^{E_1} f(E)dE + \int_{E_1}^{E_2} f(E)dE + \dots + \int_{E_{n-2}}^{E_{n-1}} f(E)dE \quad (4.18)$$

再利用式 (4.16) 或者式 (4.17), 可以得到

$$I \approx \sum_{m=0}^{n-1} a_m e^{-\psi_m}, \quad \psi_m = \mu(E_m)x \quad (4.19)$$

a_m 是关于 h_E 和 $S(E_m)$ 的多项式系数, 可以计算求得。

我们构造一个目标函数: $\varepsilon(\psi) = (I - \sum_{m=0}^{n-1} a_m e^{-\psi_m})^2$, 通过测得的透射数据值, 和一些限制条件^[4], 来反推出一组 ψ_m ($m: 0 \sim n-1$) 的值, 使得目标函数的值 $\varepsilon(\psi)$ 最小。

最后通过 ψ_i/ψ_j 来计算物质的属性值 (ψ_i 为能量为 E_i 的低能 X 射线衰减系数, ψ_j 为能量为 E_j 的高能 X 射线的衰减系数)。

上述数值积分的方法是一种比较有效的解决厚度影响的方法, 但是这种方法也有其使用的局限性。如需要双能 X 射线的发射谱, 高低能探测器在不同 X 射线能级下的探测效率, 以及方法的计算复杂性等等。限于有限的实验条件, 数值积分的方法不能直接运用到我们的伪双能透射系统中, 为此我们研究出一种计算复杂相对较小的, 能够适用于我们的实时系统的消除厚度影响的方法。

4.3.2 拓展属性空间的数据分析

用传统的方法计算的物质属性 R 值是一维的, 在伪双能透射系统中, 由于物体厚度的影响, 最终不同物质的计算结果 R_c 有重叠现象, 如图 4-3 所示:

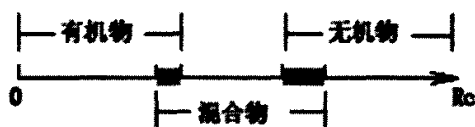
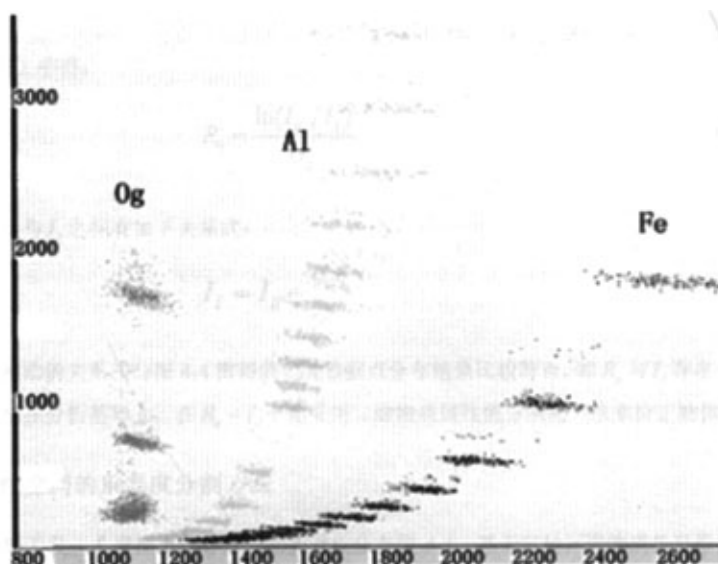


图 4-3 一维 R_c 值的重叠现象

图中灰色的区间即为物质属性重叠的部分。

为此, 我们拓展物质属性的特征空间, 引入 X 射线的衰减因素, 将原来的一维空间扩展到二维的属性空间。在此空间中, 横轴保持原来的 R_c 不变, 纵轴要与 X 射线因物体厚度不同而衰减程度不同的因素有关, 我们选择探测器实测的低能数据。理论上也可以选择高能数据, 但在我们的伪双能系统中, 由于探测器组构造的关系, 低能探测器在前, 中间夹一滤波铜片, 之后才是高能探测器, 低能探测器较高能探测器吸收的相应能级下的 X 射线更为完全, 即在透射数据的表现上, 低能数据更好, 因此我们选择低能数据作为纵轴。

实验使用有机物、混合物和无机物的三种标准块, 即阶梯型的有机玻璃、铝块和铁块, 测得它们高低能数据值, 并计算出相应的 R_c , 与低能数据值 I_l , 在构造的 $R_c - I_l$ 平面上绘制成点, 所得的结果如图 4-4 所示。图中横轴为 R_c 值 ($\times 1000$), 纵轴为 I_l 值 (消除探测器动态范围影响的 4096 级灰度)。图像中可以看出三种阶梯型标准块的数据点分布, 其中左侧深灰色的三级台阶的是有机玻璃的数据点, 中间浅灰色的多级台阶的是铝块的数据点, 右侧黑色的是铁块的数据点。


 图 4.4 实验测得的三种物质标准块在 $R_c - I_t$ 平面上的数据点的分布图

从图中三种物体的数据点分布也可以看出,由于受连续能谱 X 射线下物体厚度的影响,计算出的 R_c 值在一维方向上的重叠情况是比较严重的。尤其对于铝块和铁块, R_c 值在 1.2~2.0 左右的范围内,均有两者的数据点。而在二维的 $R_c - I_t$ 平面上,三种物体各自数据点的分布区域就比较分开,并且各自的聚敛特性也比较好。而且从图中可以看出,在二维属性空间中对于 I_t , 三种物质的 R_c 均有与指数函数曲线相近的变化关系。

基于连续能谱 X 射线透射衰减的理论,我们有式 (4.13) 的等效公式。伪双能系统探测器组之间的铜滤波片,能在很大程度上分开低能和高能探测器响应的光谱分布。而当 X 射线能量较高时, X 射线光子与物质作用的时候,康普顿散射为主要影响,因此式 (2.3) 可以写成:

$$\sigma_h \approx \sigma_{h,ncs} = 0.665Z \quad (4.20)$$

结合式 (2.2) 和 (2.10) 我们得到:

$$\mu_h(E) = 0.665 \times Z \frac{N}{A} \quad (4.21)$$

根据式 (4.21) 可以近似的认为,在伪双能系统中对于高能 X 射线的物质质量吸收系数是一个定值。使用式 (4.19) 中的 $\psi = \mu(E)x$ 定义,则式 (4.11) 中的高能部分变为:

$$I_h = \int_0^{E_h} S_{hk}(E) \times e^{-\psi_h} dE = e^{-\psi_h} \int_0^{E_h} S_{hk}(E) dE \quad (4.22)$$

即有关系:

$$I_h = e^{-\psi_h} \times I_{hf} \quad (4.23)$$

代入式 (4.13) 中得:

$$R_c = \frac{\ln(I_{hf}/I_l)}{\psi_h} \quad (4.24)$$

因此 R_c 、 ψ_h 与 I_l 之间有如下关系式:

$$I_l = I_{hf} e^{-\psi_h R_c} \quad (4.25)$$

这个由假设推出的关系式与图 4-4 测得的实验数据点分布结果比较符合, 即 R_c 与 I_l 存在一定的指数函数关系。因此我们在分析基础上, 在 $R_c - I_l$ 平面采用二维物质属性值分割的方法来校正物体的厚度影响。

4.3.3 二维属性空间的隶属度分割方法

我们已经得到了 $R_c - I_l$ 平面上, 标准块的数据点分布图 4-4。基于三种标准物质各自数据点的聚敛特性都比较好, 因此我们能够比较容易地划分出标准物质的分布区域。如铝块数据点而言, 因为标准块是阶梯型的, 在图像上也有明显的台阶状分布, 分别取每个台阶区域左边界和右边界的数据点 (个别离散点可以认为是噪点而忽略), 再分别将所有左边界的点用直线连接, 将所有右边界的点练成线。用分段直线来逼近数据点区域的边界曲线。由此我们就得到了铝块的区域边界线。同样方法划出有机玻璃和铁块的区域边界线。需要注意的是, 有机玻璃只要划出其右边界即可, 因为有 $R_c(\text{有机物}) < R_c(\text{混合物}) < R_c(\text{无机物})$ 的关系, 处于其左侧的数据点均可以认为是有机物, 同样铁块只要划出其左边界即可, 处于其右侧的数据点均可以认为是无机物。划分好区域边界的二维平面图如下所示:

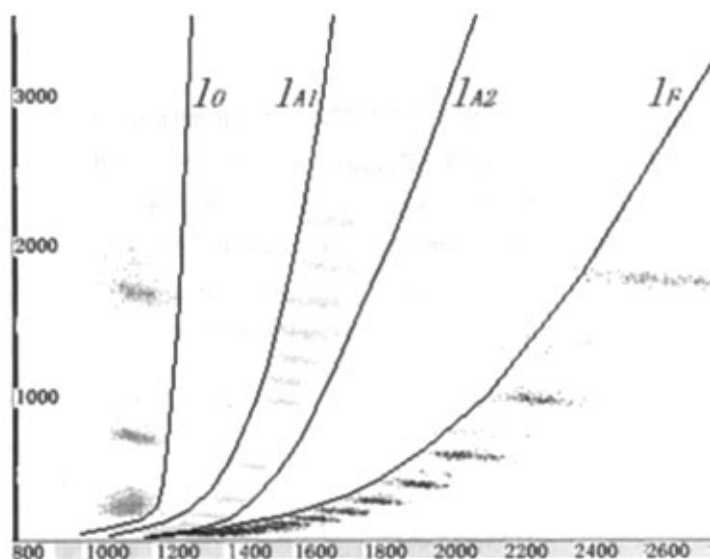


图 4-5 划分区域边界的 $R_c - I_l$ 平面图

图中 l_O 曲线左侧为有机物标准块（有机玻璃）的数据区域， l_{A1} 和 l_{A2} 曲线之间的为混合物标准块（铝）的数据区域， l_F 曲线右侧的为无机物标准块（铁）的数据区域。

对于落在 l_O 左侧、 l_{A1} 和 l_{A2} 之间、 l_F 右侧这三个区域内的数据点，我们可以直接判定它们的物质属性是有机物、混合物还是无机物。但是，对于落在 $R_c - I_i$ 平面上 l_O l_{A1} 区域之间的点，就不能立即判定出其属于有机物还是混合物；同样，落在 l_{A2} l_F 区域之间的点，也不能立即判定出其属于混合物还是无机物。

为了解决这一问题，我们引入数据点的物质属性隶属度的概念。在二维的 $R_c - I_i$ 空间中每个点 $P(x,y)$ ，分别计算出该点属于三种标准物质的概率 ν_{Og} ， ν_{Al} 和 ν_{Fe} 。具体计算方法如下。

因为我们已经在 $R_c - I_i$ 平面上划出了物质区域，并有 l_O 、 l_{A1} 、 l_{A2} 和 l_F 四条边界曲线，因此对于纵坐标上 I_i 的每一级灰度，与边界曲线都会有四个交点，设为 R_O ， R_{A1} ， R_{A2} 和 R_F 。构造一个简单的计算隶属度的模型，如图 4-6 所示：

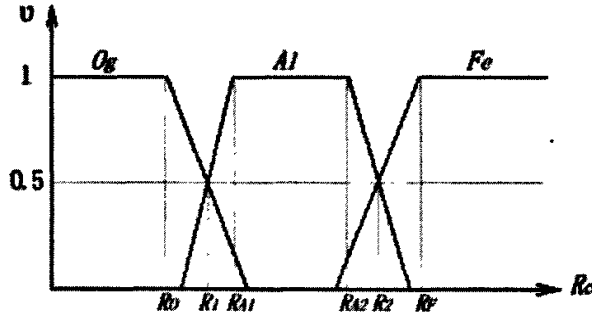


图 4-6 隶属度计算方法模型

横坐标为 R_c 值，纵坐标为物质属性概率值，即隶属度（0~1）。 R_O 对应于有机物隶属度为 1 的点， R_{A1} 、 R_{A2} 和 R_F 分别对应于混合物和无机物的隶属度为 1 的点。其中 R_1 和 R_2 两点定义为该灰度下，标准物隶属度为 0.5 处的 R_c 值。为计算方便，在此处我们分别取 R_1 和 R_2 为 R_O 与 R_{A1} 、 R_{A2} 与 R_F 的中值。根据 R_O 、 R_{A1} 、 R_{A2} 、 R_F 和 R_1 、 R_2 这六个点，分别构造有机物、混合物和无机物的隶属度计算梯形。同时将该灰度级下分成五个区间： $[0, R_O]$ ， $[R_O, R_{A1}]$ ， $[R_{A1}, R_{A2}]$ ， $[R_{A2}, R_F]$ ， $[R_F, \infty]$ 。落在该灰度级上的所有的点，都能通过这五个区间中的三种物质的隶属度计算公式算出其对应的三个隶属度 ν_{Og}' 、 ν_{Al}' 和 ν_{Fe}' 。

区间 1: $[0, R_O]$ 的计算公式为：

$$\left. \begin{aligned} \nu_{Og}' &= 1 \\ \frac{\nu_{Al}' - 1}{R_c - R_{A1}} &= \frac{1 - 0.5}{R_{A1} - R_1} \Rightarrow \nu_{Al}' = \frac{0.5}{R_{A1} - R_1} \times (R_c - R_{A1}) + 1 \\ \frac{\nu_{Fe}' - 1}{R_c - R_F} &= \frac{1 - 0.5}{R_F - R_2} \Rightarrow \nu_{Fe}' = \frac{0.5}{R_F - R_2} \times (R_c - R_F) + 1 \end{aligned} \right\} \quad (4.26)$$

区间 2: $[R_O, R_{A1}]$ 的计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{v_{Og}' - 1}{R_c - R_O} &= \frac{1 - 0.5}{R_O - R_1} \Rightarrow v_{Og}' = \frac{0.5}{R_O - R_1} \times (R_c - R_O) + 1 \\ v_{Al}' &= \frac{0.5}{R_{A1} - R_1} \times (R_c - R_{A1}) + 1 \\ v_{Fe}' &= \frac{0.5}{R_F - R_2} \times (R_c - R_F) + 1 \end{aligned} \right\} \quad (4.27)$$

区间 3: $[R_{A1}, R_{A2}]$ 的计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} v_{Og}' &= \frac{0.5}{R_O - R_1} \times (R_c - R_O) + 1 \\ v_{Al}' &= 1 \\ v_{Fe}' &= \frac{0.5}{R_F - R_2} \times (R_c - R_F) + 1 \end{aligned} \right\} \quad (4.28)$$

区间 4: $[R_{A2}, R_F]$ 的计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} v_{Og}' &= \frac{0.5}{R_O - R_1} \times (R_c - R_O) + 1 \\ \frac{v_{Al}' - 1}{R_c - R_{A2}} &= \frac{1 - 0.5}{R_{A2} - R_2} \Rightarrow v_{Al}' = \frac{0.5}{R_{A2} - R_2} \times (R_c - R_{A2}) + 1 \\ v_{Fe}' &= \frac{0.5}{R_F - R_2} \times (R_c - R_F) + 1 \end{aligned} \right\} \quad (4.29)$$

区间 5: $[R_F, \infty]$ 的计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} v_{Og}' &= \frac{0.5}{R_O - R_1} \times (R_c - R_O) + 1 \\ v_{Al}' &= \frac{0.5}{R_{A2} - R_2} \times (R_c - R_{A2}) + 1 \\ v_{Fe}' &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (4.30)$$

则对于二维 $R_c - I_l$ 平面上的任意一个数据点 $P(R_c, I_l)$, 根据其物质属性值和低能数据值, 我们都可以求出该点的三个隶属度 v_{Og}' 、 v_{Al}' 和 v_{Fe}' 。示意公式如下:

$$\left. \begin{aligned} v_{Og}' &= f_{Og}(R_c, I_l) \\ v_{Al}' &= f_{Al}(R_c, I_l) \\ v_{Fe}' &= f_{Fe}(R_c, I_l) \end{aligned} \right\} \quad (4.31)$$

具体方法是首先根据该点的低能灰度值确定该灰度级的隶属度计算模型, 然后将该点的物质属性值代

入模型计算，如落在 $[0, R_0]$ 区间中的数据点，其物质属性隶属度的有机物、混合物和无机物三个分量值对应的直线计算方程分别为有机物梯形的顶边、混合物梯形的左腰和无机物梯形的左腰。由此计算得到数据点的隶属度值。然后对这三个隶属度值进行归一化：

$$\left. \begin{aligned} \nu_{Og} &= \frac{\nu_{Og}'}{\nu_{Og}' + \nu_{Al}' + \nu_{Fe}'} \\ \nu_{Al} &= \frac{\nu_{Al}'}{\nu_{Og}' + \nu_{Al}' + \nu_{Fe}'} \\ \nu_{Fe} &= \frac{\nu_{Fe}'}{\nu_{Og}' + \nu_{Al}' + \nu_{Fe}'} \end{aligned} \right\} \quad (4.32)$$

由式(4.31)和(4.32)我们得到了数据点隶属度的最终计算结果。最终的物质属性是根据隶属度的 ν_{Og} 、 ν_{Al} 和 ν_{Fe} 这三个分量的大小决定的。数据点隶属度的三个分量值不仅能够反映出物质的属性信息，还反映了该物质的属性与标准物之间的过渡信息，在下文的真彩色图像颜色融合的方法中将会进一步使用到隶属度的三个分量值。

4.4 实验应用

我们选取了几种不同材料的物体，钢板、铝合金板、印制电路板、饮料和纺织品来进行实验对比。实验结果如表 4.1 所示：

表 4.1 隶属度分割实验结果

物质	等效物质属性值 R_c	隶属度		
		ν_{Og}	ν_{Al}	ν_{Fe}
钢板(5mm)	1.836	0	0	1.00
钢板(10mm)	1.521	0.02	0.22	0.76
铝合金板(7mm)	1.658	0.07	0.76	0.17
铝合金板(14mm)	1.307	0.01	0.64	0.35
印制电路板	1.506	0	0.87	0.13
饮料	1.315	0.74	0.26	0
毛织品	1.027	1.00	0	0

从表中的结果可以看出，虽然在连续能谱的 X 射线下计算出的物质属性 R_c 值受物体厚度的影响而有重叠现象，如 5mm 厚的钢板和 7mm 厚的铝合金板，14mm 厚的铝合金板和饮料，其 R_c 值已经发生了交错。但是将属性空间扩展到二维的 $R_c - I_i$ 平面后，使用上述的隶属度分割的方法，能够比较有效的校正厚度影响，不同厚度的钢板，铝合金板和饮料其三种物质的隶属度中，分别是 ν_{Fe} 值、 ν_{Al} 值和 ν_{Og} 值占优，新方法增加了物质判别的准确性。

但是对于比较厚的物体，尤其是无机物，由于透射过的 X 射线的穿透性降低，噪声对结果的影响加大，因此在较低的灰度区域，仍然存在着一定的厚度效应。这可以通过改进物质属性计算方法以及提高信号采集时 A/D 转换的采样率来进一步得到校正。另外，本文所构造的隶属度计算模型是简单的梯形，采用这样模型的优点是计算简单，更加符合实时系统的应用要求，但其效果可能不是最好的。还可以考虑构造如曲线等的隶属度计算模型，以提高物质分类的效果。因为本文实验是基于 X 射线透射系统的，因此能够得到物质信息为物体的轮廓、图像和属性值。对于一些形态属性与普通物质相近高危物质，如炸药、毒品等，还需要结合散射系统获得物质的密度信息来对这类物体加以判别。

图 4-7 为使用二维属性空间的隶属度分割方法得到的三种标准块的彩色图像。与图 4-2，用传统的一维 R_c 值分割有机物、混合物和无机物的方法的彩色图像进行对比，我们发现新方法在物体厚度影响的校正上有明显的效果。就标准块而言，厚度较薄的有机玻璃与铝块、厚度较薄的铝块与厚度较厚的铁块之间，已经能够比较清晰地区分开来。这为以后的复杂行李物品的属性区分打下了较好的基础。

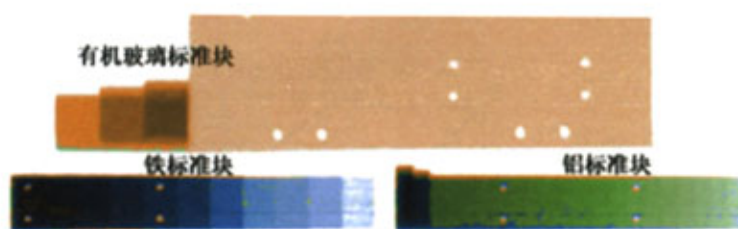


图 4-7 校正厚度效应的标准块图

4.5 本章小结

本章首先介绍了双能系统传统的通过高低能数据计算物质属性的理论基础和算法，随后引出了传统算法应用于伪双能系统的缺陷——物体的厚度效应导致属性值计算结果的偏差，接着在考虑到实时系统应用性的基础上，提出一种实用性强的校正厚度影响的物质属性判别方法，即引入 X 射线的衰减因素到物质属性空间中，将属性空间由原来的一维扩展到二维平面，在高维特征空间中分割物质属性，并且引入了物质属性隶属度的概念。数据表明实验结果在实际应用中有较好的效果，而且物质的属性隶属度为之后的伪彩图像处理打下了基础。

第五章 透视图像的伪彩处理

5.1 灰度图像的彩色赋值方法

5.1.1 用于显示的 RGB 色彩模型

RGB 是最常用的色彩空间模型^[45], R、G、B 分别指红色、绿色和蓝色。自然界绝大部分的可见光都可以通过使用红、绿、蓝这三种颜色的不同比例来混合得到。因此红、绿、蓝被称为三原色。三原色模型可以应用于大多数光照和显示的场合。计算机的彩色 CRT 显示器即典型的 RGB 色彩模型, 显示器通过红、绿、蓝三种荧光粉的发射光线来产生彩色。

RGB 色彩空间由一个三维的笛卡儿直角坐标系中的立方体来表示。如图 5-1 所示:

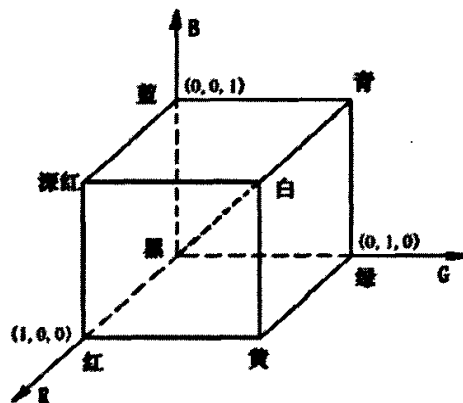


图 5-1 RGB 色彩空间

其中从(0,0,0)到(1,1,1)这条线段上的值就是灰度值。在 Windows 操作系统中, RGB 每个分量的值都是 256 级的, 从 0~255, 每个分量占用 8 个 bit。如果 RGB 三个分量的值均相等, 则表示灰度值。灰度值也是 256 级的, 从 0~255 (黑~白)。

5.1.2 传统的伪彩赋值方法

将灰度图像变为伪彩色图像是数字图像处理中常用的操作。因为人眼对于灰度层次变化的敏感程度要远远小于对彩色的变化。将灰度图像转换成彩色图像能够帮助我们更加清楚地分辨出图像的层次结构。通常使用的伪彩赋值方法是使用伪彩色编码查找表^[46]。常用的有“彩虹编码”、“热金属编码”等等。伪彩色编码查找表就是根据 256 级的灰度值, 设置的 256 组 RGB 的色彩值, 每一组 RGB 的值对应一个灰度值。在图像转换时, 根据原灰度图的灰度数值, 查找得的相应的 RGB 值并赋予转换后的图像, 由此得到原灰度图的伪彩色图像。如图 5-2 示:

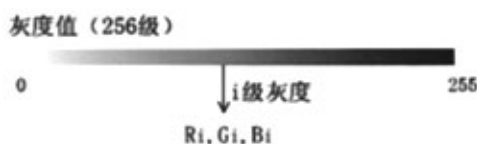


图 5-2 伪彩色赋值方法

对于单能 X 射线透射系统而言, 由于没有采集双能数据, 无法得到物体的物质属性信息, 因此单能系统的彩色图像不能直观地反映出有机物、混合物和无机物。其采用的彩色图像赋值方法就是这种使用伪彩色编码查找表的方法。通常是把 256 级的灰度区间分成三个部分, 灰度较浅的赋橙色, 灰度较深的赋蓝色, 中间的部分赋绿色。这种单能系统的伪彩色图像只能加深原图的层次结构感, 并不能根据色彩来判别物质。图 5-3 为单能系统使用伪彩色编码查找表的方法得到的图像。

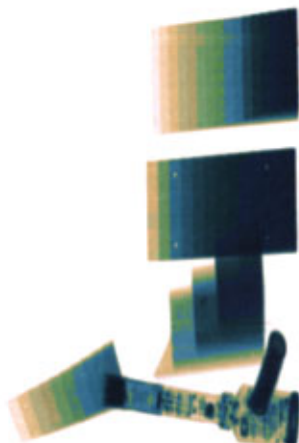


图 5-3 单能伪彩色图像



图 5-8 真彩色图像

而在我们的伪双能系统中, 由于计算出了物体的物质属性信息, 即其隶属度, 可以根据不同属性的物体赋不同的色彩, 通过彩色图像中不同物体的不同色彩来更加直观有效地辨别物体。我们称这样的包含物质属性信息的彩色图像为真彩色图像。

5.1.3 HSL 色彩空间

由于真彩色图像的赋值方法是基于 HSL 空间的, 因此我们在这里先介绍一下 HSL 色彩空间^[67]。HSL 色彩空间是由色调 (Hue)、饱和度 (Saturation) 和亮度 (Lum) 这三者构成的。色调 (H) 与饱和度 (S) 构成一个极坐标的二维平面, 亮度 (L) 为垂直于这个平面的轴。H 定义为极坐标平面中的点与 S 轴的夹角, 红色为 0° , 绿色为 120° , 蓝色为 240° , 角度之间的为过渡颜色, S 定义为从色彩点到极坐标零点的距离, 它反映了所取颜色的纯度。图 5-4 显示了色调与饱和度的二维平面。

L 值反映了光照的强度变化。当光照强度为 100% 时, 则所有颜色都变成了白色, 光照强度为 0% 时, 所有的颜色都变成了黑色, 光照强度为 50% 时为纯彩色。L 值从小到大的渐变过程, 就是所取颜色从黑色

—原色—白色的渐变过程。这样的亮度参数对颜色的影响规律是我们下文提到的真彩色赋值的基础。

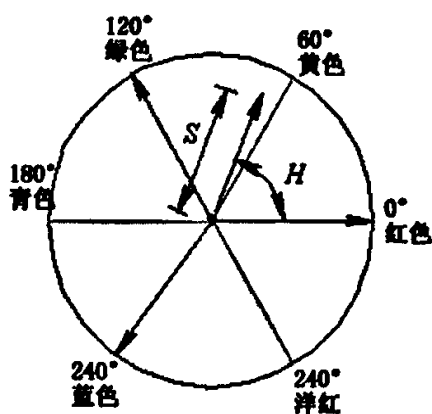


图 5-4 H 与 S 的二维平面图

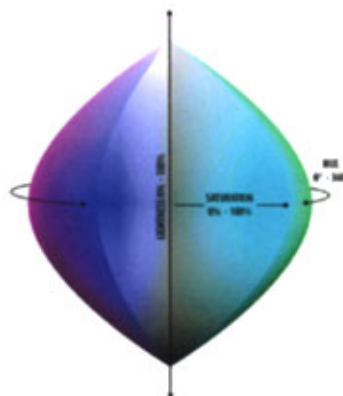


图 5-5 HSL 色彩空间图

我们虽然基于 HSL 色彩空间赋色彩，但最终在计算机屏幕上显示的时候，还要将 HSL 色彩空间的值转化为 RGB 值显示。HSL 色彩空间是从更加常用的 HSV 色彩空间转变而来的^[48]。HSL 与 HSV 空间不同之处在于，HSL 空间结构类似与两个底面相和的圆锥，如图 5-5 所示；而 HSV 空间结构类似与一个倒六棱锥，如图 5-6 所示：

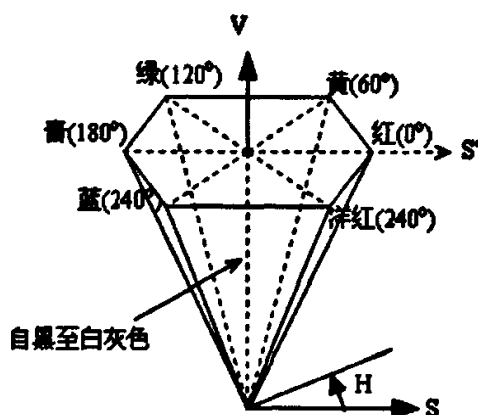


图 5-6 HSV 色彩空间图

HSV 的衍生模型 HSL 与 RGB 空间的转化算法，虽然与 HSV 转 RGB 的算法有点类似，但相对比较复杂。现将方法简述如下：

首先假设 H、S、L 三个分量的值为范围都在 0~1 之内小数，R、G、B 三个分量的值为范围都在 0~255 之内的整数。当饱和度 $S=0$ 时，此时的色彩值即为灰度值，有

$$\left. \begin{aligned} R &= L \times 255 \\ G &= L \times 255 \\ B &= L \times 255 \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

当 $S > 0$ 时, 设两个计算需要的变量为 m , n 和 $H1$, $H2$, 有

$$\begin{aligned} &\begin{cases} n = L \times (1 + S), L < 0.5 \\ n = (L + S) - (L \times S), L \geq 0.5 \end{cases} \\ &m = 2L - n \\ &H1 = \begin{cases} H + 4/3, (H + 1/3) < 0 \\ H + 1/3, 0 \leq (H + 1/3) \leq 1 \\ H - 2/3, (H + 1/3) > 1 \end{cases} \\ &H2 = \begin{cases} H + 2/3, (H - 1/3) < 0 \\ H - 1/3, 0 \leq (H - 1/3) \leq 1 \\ H - 4/3, (H - 1/3) > 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (5.2)$$

则转化后的 RGB 三个值分别为:

$$\begin{cases} R = 255 \times f(m, n, H1) \\ G = 255 \times f(m, n, H) \\ B = 255 \times f(m, n, H2) \end{cases} \quad (5.3)$$

其中函数 f 为 HSL 到 RGB 的转换函数, 定义如下:

$$f(x, y, z) = \begin{cases} x + (y - x) \times 6z, (z < 1/6) \\ y, (1/6 \leq z < 1/2) \\ x + (y - x) \times 6(2/3 - z), (1/2 \leq z < 2/3) \\ x, \text{else} \end{cases} \quad (5.4)$$

根据式 (5.3) 计算出来的值就是 HSL 空间转化到 RGB 空间的三个分量值。

5.1.4 真彩色赋值方法

伪双能系统中由于有高低能数据计算出来的物质属性信息, 根据属性给不同的物体上其对应物质的颜色, 得到的彩色图像为真彩色图像。在把双能数据的灰度图像转换成真彩色图像的过程中, 需要注意的就是, 原灰度图像有 256 级的层次, 这种层次感从阶梯型的标准块的不同厚度台阶的灰度值不同表现出来。厚度大的台阶灰度深, 厚度小的台阶灰度浅。而我们转换成为的彩色图像中, 应当能够保留住这个物体厚度层次的信息。举例来说, 如果阶梯型的铁标准块在灰度图像中能够分辨出 10 个不同厚度的台阶, 那么在转成彩色图像后, 能分辨出的不同厚度的台阶数应当尽可能地接近 10 个或等于 10 个, 这样灰度到彩色的图像转换后, 原图的层次感才不至于丢之 (在人眼能够察觉的范围内)。

因为如前文所述, HSL 色彩空间中, L 分量是表示光照强度的值。L 从 0% 到 100% 的变化表示颜色从

黑到纯彩色再到白的过程, 因此 L 分量最适合作为原图灰度信息的一个表达。在 Windows 系统中, HSL 空间的分量值范围是从 0~239, 虽然将 256 级的灰度值映射到 240 级亮度值, 会产生 16 级信息的丢失, 但是对于图像整体而言, 人眼对于接近黑色和接近白色灰度级或者是色彩级的敏感程度是很小的, 即对于人眼而言, 16 级相对与 256 级的层次, 能够分辨察觉到的基本可以忽略不计。因此将灰度映射到亮度来保留图像的层次感信息的方法是可以行得通的。这在之后我们的实验中也得到了验证。

真彩色赋值方法的主要原理就是用 H 值和 S 值来确定物质属性的基色调, 然后通过灰度映射到亮度的方案来确定色彩值的。

因为对于标准块的颜色是确定的, 有机物为纯橙色、混合物为纯绿色、无机物为纯蓝色。我们首先确定标准块纯色的 H 值和 S 值。例如对于橙色, 我们选定 H 值为 18, S 值为 239 (纯色彩的饱和度值均为 239), L 值从 0~239 根据灰度值的变化而变化。其次将 256 级的灰度映射到 240 级的亮度上, 采用简单的一段线性映射。如图 5-7 所示:

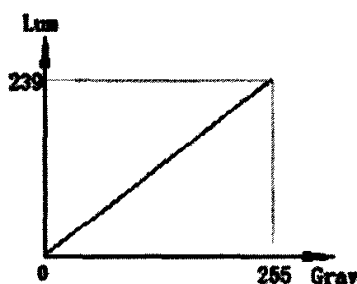


图 5-7 灰度映射到亮度图

$$L = \frac{240}{256} \times G + 0.5 \quad (5.5)$$

由此我们得到了标准颜色的 H 、 S 、 L 三个分量值。然后可以套用公式 (5.3) 来计算出对应的 RGB 值。因为对于标准颜色来说, 其 H 和 S 值是固定的, 唯一变化的是随灰度值的不同而改变的 L 值。根据这一特点, 观察转化后 RGB 值的变化规律, 我们也可以用一种更加简单的转换方法来从 HSL 值到 RGB 值。

L 值表示的是光照强度, 当 L 值为 120 (L : 0~239), 即 L 为其取值区间的中点值时, 得到的色彩是纯彩色, 当 L 值由中点往渐小或渐大的方向变化时, 色彩向黑色或白色的趋势变化。我们简化转换计算方法分为两步:

- (1) 计算 H 、 S 值确定的一种色彩, 其 L 值从 0 到 120 变化时的对应的 RGB 值;
- (2) 计算该种色彩的 L 值从 120 到 239 变化时的对应的 RGB 值。

这样做的原因时, 一种色彩 (H 、 S 值固定) 的 L 在 120 之前和 120 之后变化时, 与其对应的 RGB 三个分量的变化规律分别是不同的。如上面定义的橙色 (H : 18, S : 240), 其 L 从 0 到 120 时, R 分量的转换值从 0 到 255 线性变化的, 而在 L 从 120 到 240 时, R 分量的转换值始终是 255。G、B 分量的转换值同样如此。因为 L 从 0 到 120 和从 120 到 240 时, 对应 RGB 分量的转换值的变化始终都是线性的, 因此只要知道了一种色彩其 L 值在 120 处对应的 RGB 分量值, 假设为 R_m 、 G_m 和 B_m , 通过简单的线性公式就可以求出其他 L 值对应的 RGB 值:

$L < 120$ 时,

$$\begin{cases} R = \frac{R_m}{120} \times L \\ G = \frac{G_m}{120} \times L \\ B = \frac{B_m}{120} \times L \end{cases} \quad (5.6)$$

$L \geq 120$ 时,

$$\begin{cases} \frac{R - R_m}{L - 120} = \frac{255 - R_m}{239 - 120} \Rightarrow R = \frac{255 - R_m}{119} \times (L - 120) + R_m \\ G = \frac{255 - G_m}{119} \times (L - 120) + G_m \\ B = \frac{255 - B_m}{119} \times (L - 120) + B_m \end{cases} \quad (5.7)$$

由式 (5.7) 可以更加方便快捷地计算出基于 HSL 标准色彩对应于不同 L 值的 RGB 值。

图 5-8 为采用这种方法的标准块的真彩色图像, 图中从上到下依次为铝标准块(混合物)、铁标准块(无机物)和有机玻璃标准块(有机物), 与左侧的图 5-3 伪彩色图像对比, 可以明显看出真彩色图像在物质鉴别上的优势。

5.1.5 基于隶属度的色彩融合

用上述真彩色赋值的方法, 根据数据点最终竞争得到的物质属性隶属度和该点的低能灰度值, 就可以得到该点对应的真彩色 RGB 值。这种方法也存在着不足: 因为物质属性隶属度竞争的结果只有一个分量胜出, 即该数据点的属性只可能是有机物、混合物和无机物这三种可能中的一种。因此数据点的真彩色也随之可能为三种标准物颜色中的一种。尽管色彩有着以原数据点灰度变化为基础的亮度变化, 但不同物质之间的色彩平滑过渡仍旧是一个问题。即假如对于一个数据点其隶属度的三个分量为 $\nu_{Og}=0.45$ 、 $\nu_{Al}=0.55$ 和 $\nu_{Fe}=0$, 虽然其最终的物质属性为混合物, 赋的色彩也是绿色, 但是从隶属度的三个分量值上看, 这个数据点的属性已经非常接近有机物了。很有可能该点是图像中有机物与混合物的边缘。但是该点被赋的色彩是混合物的标准颜色, 因此对于有机物和混合物这两者之间, 起不到一个不同物质之间颜色平滑过渡的作用。如图 5-9 和 5-10 所示:

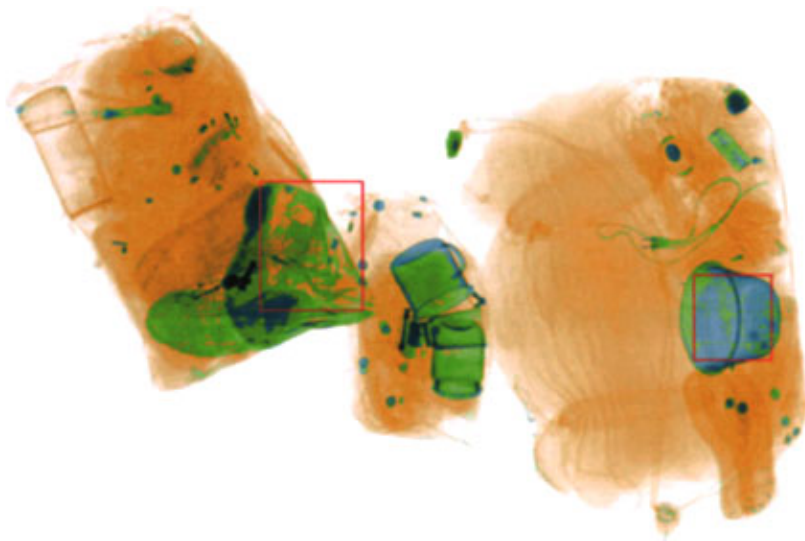


图 5-9 非平滑过渡的真彩图 1

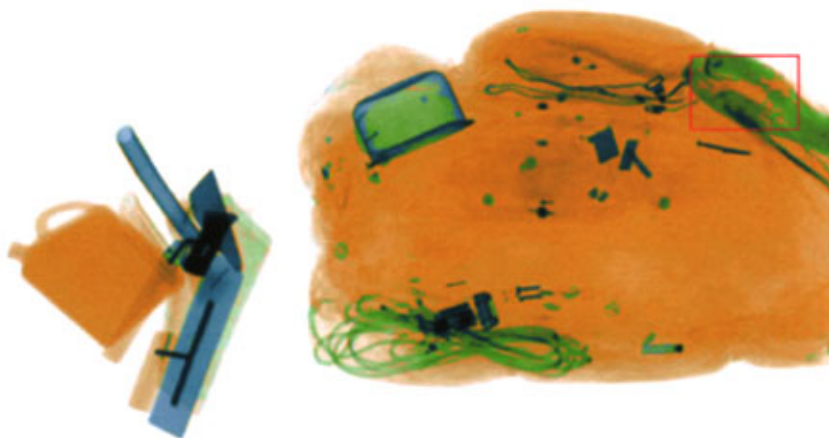


图 5-10 非平滑过渡的真彩图 2

尤其是在图中用红框标出的区域显示，不同物质边界上的颜色过渡是很差的。这虽然不会影响真彩色图像的物质判别，但从图像整体而言，其显示质量是不够好的。

为此，我们使用结合物质属性隶属度的另外两个分量的色彩融合的方法，来实现不同物质边界颜色的平滑过渡的效果。

假设两种颜色的 RGB 值分别为 R_1, G_1, B_1 和 R_2, G_2, B_2 ，则这两种颜色相互融合后的 RGB 值计算公式为^[49]：

$$\begin{cases} R = \alpha \times R1 + (1 - \alpha) \times R2 \\ G = \alpha \times G1 + (1 - \alpha) \times G2 \\ B = \alpha \times B1 + (1 - \alpha) \times B2 \end{cases} \quad (5.8)$$

式中的 α 为融合系数,范围从0~1,表示融合后的颜色分别与两种原色的接近程度。由此可以看出 α 系数的含义和作用与上文中我们计算出的物质属性的隶属度是非常符合的。因此,我们将结合隶属度值的色彩融合公式定义如下:

假设有有机物、混合物和无机物的三种标准颜色的 RGB 值分别为: R_O, G_O, B_O 、 R_A, G_A, B_A 和 R_F, G_F, B_F , 某个数据点隶属度的三个分量分别为: ν_{Og} 、 ν_{Al} 和 ν_{Fe} , 则融合后该点色彩的 RGB 值为:

$$\begin{cases} R = \nu_{Og} \times R_O + \nu_{Al} \times R_A + \nu_{Fe} \times R_F \\ G = \nu_{Og} \times G_O + \nu_{Al} \times G_A + \nu_{Fe} \times G_F \\ B = \nu_{Og} \times B_O + \nu_{Al} \times B_A + \nu_{Fe} \times B_F \end{cases} \quad (5.9)$$

对于图 5-9 和 5-10 的数据采用基于隶属度的色彩融合的方法,得到的最终图像如图 5-11 和 5-12 所示。从结果图中可以看出,物质属性介于两种不同物质之间的数据点的颜色赋值已经变得具有过渡性,提高了真彩色图像整体的显示质量。

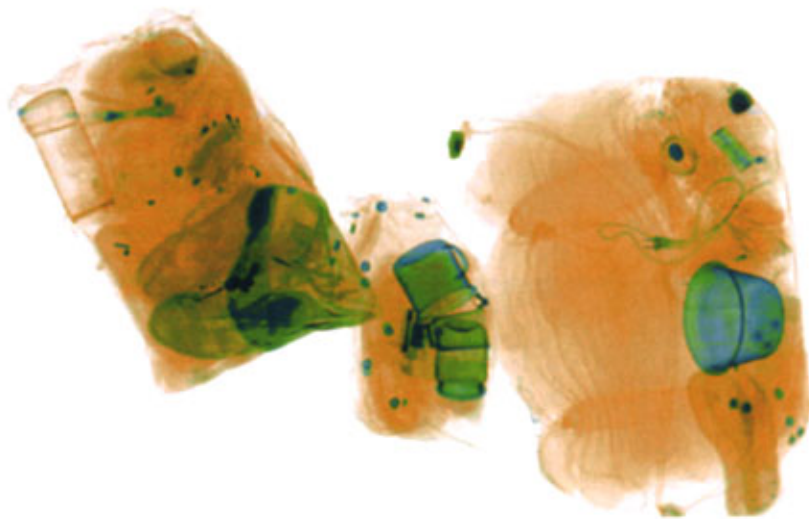


图 5-11 色彩融合图 1

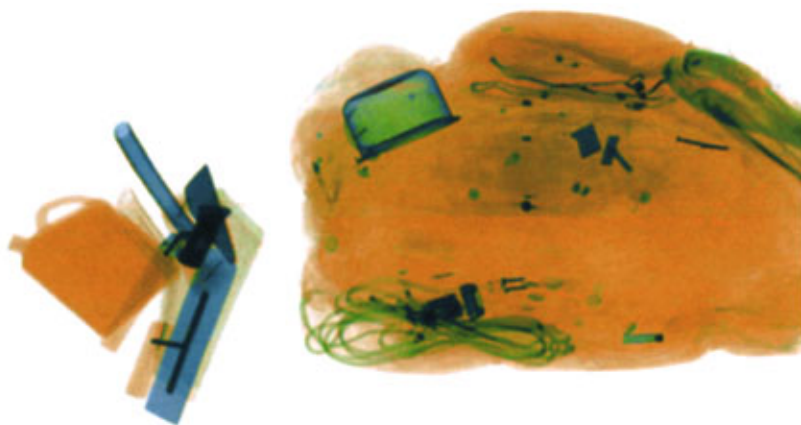


图 5-12 色彩融合图 2

5.2 伽马校正和分物质亮度调节

5.2.1 伽马校正

伽马校正即灰度的幂次变换^{[50][51][52]}，是比较常用的灰度映射方法之一。幂次变换的公式为：

$$s = c \times r^\gamma \quad (5.10)$$

式中的 r 为输入的灰度值； c, γ 是幂次变化的调节系数，两者都是正整数。幂次变换的映射曲线如图 5-13 所示。从图中可以看出，幂次变换中的 r 值在小于 1 时，映射把输入的窄带值映射到宽带输出值，当 r 值大于 1 时，把输入的宽带值映射到输出的窄带值，当 $r=1$ 时，幂次变换简化为成正比变换。

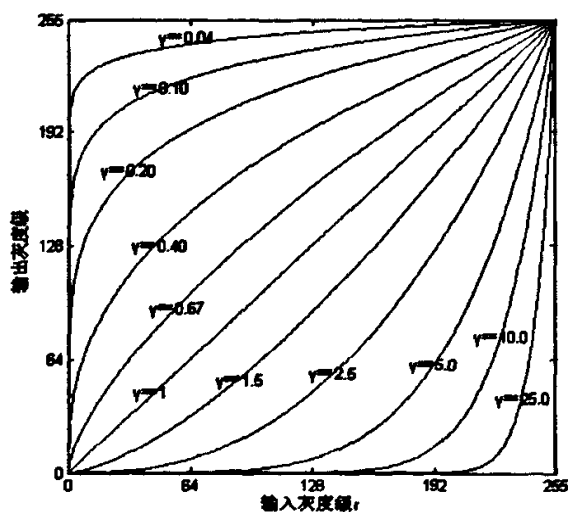


图 5-13 幂次变换映射曲线

幂次变换的特性使得其能够应用在扩大对比度的图像增强操作中。例如我们可以取 r 值小于 1 来增强原图像中较暗区域的层次，或者也可以取 r 值大于 1 来增强原图像中较亮区域的层次。

5.2.2 分物质亮度调节

我们使用伽马校正并不是调节灰度图像的对比度的，而是为了改善真彩色图像的显示质量。因为在我们的伪双能真彩色图像中，不同物体由于其物质属性的关系，显示的亮度不同。例如在同一幅图像中，无机物往往是显示亮度最暗的部分，而混合物则亮度适中（较厚的混合物亮度也很低），有机物亮度正常或者有时候会稍高些。如图 5-8 显示。



图 5-8 真彩色图像



图 5-14 伽马校正亮度图

因此在真彩色赋值方法中，在将物体的灰度值映射到 HSL 色彩空间的 L 值时，我们分别对不同物质的 L 值映射过程作不同的幂次变换，即对不同的物质的亮度作不同程度的伽马校正。对于有机物、混合物和无机物，分别取各自对应的幂次变换的系数为 c_O , c_A , c_F （这三者可以不等，为调节方便，本实验取相等，即 $c_O=c_A=c_F=c$ ），和 $\gamma_O, \gamma_A, \gamma_F$ 。根据上述三种物质的亮度表现，和图 5-13 所示的幂次变换的曲线关系，一般取 $\gamma_O < \gamma_A < \gamma_F$ ，且有 $\gamma_O < \gamma_A < 1$ ，即不同程度地抬高无机物和混合物的亮度； γ_F 可以小于 1，也可以大于 1，其亮度调节视有机物的亮度而定。

$$\begin{cases} L_O = c \times r^{\gamma_O} \\ L_A = c \times r^{\gamma_A} \\ L_F = c \times r^{\gamma_F} \end{cases} \quad (5.11)$$

r 为低能灰度值, r 的范围从 0~255; L 为亮度值, 其范围需归一化到 0~239。首先根据式 (5.11) 计算出该数据点对应属性的亮度映射值, 然后通过真彩色的赋值方法得出调节后的色彩值。图 5-14 是用这种方法校正亮度后的图像, 与原彩色图像对比, 我们可以发现, 无机物和混合物尤其是其厚度较大的部分, 能够分辨出的层次变多了。

5.3 图像的平滑抬亮增强

5.3.1 均方差的平滑评估方法

图像的边缘是图像的基本特征之一。边缘就是指其周围像素点灰度的有阶跃变化的那些像素的集合。边缘广泛存在与物体与背景之间或者物体与物体之间, 增强图像中的边缘显示能够帮助我们更好地分辨不同的物体^[53]。

常用的边缘检测算子有许多种^[54], 在这里我们不加赘述。我们所要讨论的是图像边缘检测及增强方法的一个补充——平滑抬亮。

图像边缘增强的方法通常采取用合适的边缘检测算子检测出边缘, 即找到那些区域像素点的灰度值有阶跃变化的集合, 然后加深灰度的方法来实现。而平滑抬亮的方法与此相反, 首先计算出区域像素点的平滑程度, 然后根据平滑程度来调节灰度。平滑程度越大, 灰度抬高的越多, 平滑程度越小, 灰度抬高的越少。由此来和边缘检测方法互相配合, 共同突出图像中的物体轮廓。因为在实际的包裹图像中, 某些灰度较小的区域中也可能存在着一定的边缘信息。而这些边缘信息通过普通的边缘增强, 即检测边缘并加深灰度的方法, 无法清晰地表现出来。这时就需要用到平滑抬亮的补充方法。通过计算灰度较小区域的平滑度并抬高平滑度较大区域的亮度, 由此来突出显示这些区域的边缘信息。

首先我们要计算区域的平滑程度。因为区域的平滑程度与灰度阶跃变化程度相反, 因此我们只要计算出灰度的阶跃变化程度, 取其倒数, 就是该区域的平滑程度。可以有多种计算方法。我们取其两种。

第一种方法是取区域像素点灰度值的均方差 σ 的倒数作为平滑程度, 设之为 s 。对于图像中一个 3×3 的区域窗口而言, 如图 5-15 所示, 首先计算出该区域中的平均灰度值 μ

$$\begin{aligned} \mu = & (f(x-1, y-1) + f(x-1, y) + f(x-1, y+1) \\ & + f(x, y-1) + f(x, y) + f(x, y+1) \\ & + f(x+1, y-1) + f(x+1, y) + f(x+1, y+1)) / 9 \end{aligned} \quad (5.12)$$

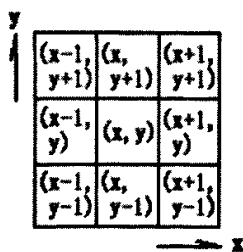


图 5-15 3×3 的区域窗口

然后计算区域中像素点灰度值的均方差:

$$\sigma = \frac{1}{3} \sqrt{\begin{aligned} &((f(x-1, y-1) - \mu)^2 + ((f(x-1, y) - \mu)^2 + ((f(x-1, y+1) - \mu)^2 \\ &+ ((f(x, y-1) - \mu)^2 + ((f(x, y) - \mu)^2 + ((f(x, y+1) - \mu)^2 \\ &+ ((f(x+1, y-1) - \mu)^2 + ((f(x+1, y) - \mu)^2 + ((f(x+1, y+1) - \mu)^2 \end{aligned}} \quad (5.13)$$

则该区域的平滑系数为 $s = \frac{1}{\sigma}$ 。设原灰度值为 g ，抬亮的灰度值由下式给出：

$$\Delta g = a \times \frac{\sqrt{g}}{s} = a \sqrt{g} \times \sigma \quad (5.14)$$

式中的 a 为灰度抬亮的幅度值。

图 5-16 和 5-17 为采用这种方法平滑抬亮的原图和结果图。可以看出，图中灰度较小的平滑区域的边缘信息得到了明显的加亮和突出。

因为在第一种方法中，为了计算区域的平滑系数，首先要扫描一遍区域算出其灰度均值，然后再扫描一遍区域使用乘方和开放计算平滑系数，因为乘除法运算对系统来说是比较耗时的。而伪双能透射系统要求实时显示数据图像，因此我们需要尽可能地简化计算复杂度而达到或接近预定的效果。基于差分计算的平滑抬亮是我们使用的方法。

5.3.2 差分的平滑评估方法

假设我们仍取 3×3 的窗口区域，如图 5-15 所示。定义中心点 (x, y) 相邻的左右两列的各自的灰度均值的差的绝对值为 $|\Delta x|$ ：

$$|\Delta x| = \left| \frac{f(x-1, y+1) + f(x-1, y) + f(x-1, y-1)}{3} - \frac{f(x+1, y+1) + f(x+1, y) + f(x+1, y-1)}{3} \right| \quad (5.15)$$

定义中心点 (x, y) 相邻的上下两行的各自的灰度均值的差的绝对值为 $|\Delta y|$ ：

$$|\Delta y| = \left| \frac{f(x-1, y+1) + f(x, y+1) + f(x+1, y+1)}{3} - \frac{f(x-1, y-1) + f(x, y-1) + f(x+1, y-1)}{3} \right| \quad (5.16)$$

则该区域的平滑系数为 $s = |\Delta x| + |\Delta y|$

设原灰度值为 g ，抬亮的灰度值由下式给出：

$$\Delta g = a \times \frac{\sqrt{g}}{\sqrt{s}} \quad (5.17)$$

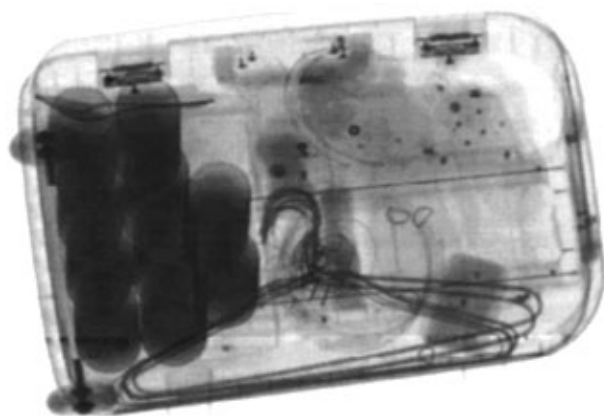


图 5-16 平滑拾亮原图

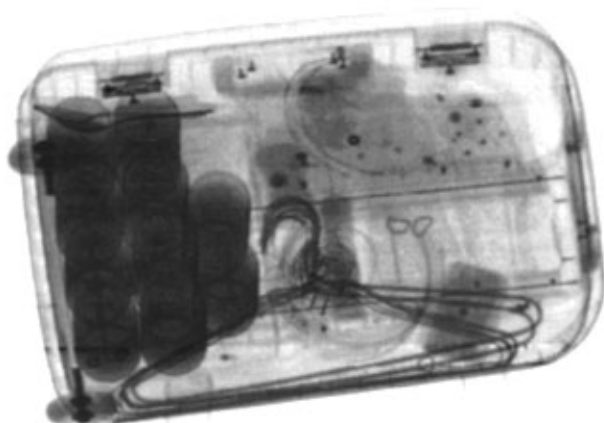


图 5-17 平滑拾亮结果图 (方法 1)

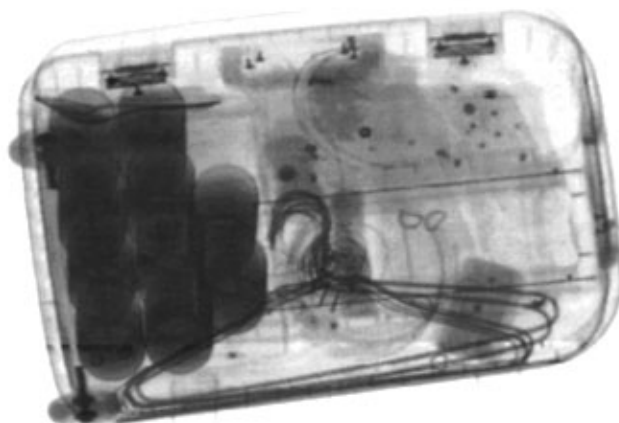


图 5-18 平滑拾亮结果图 (方法 2)

这种方法的整个计算过程只需扫描一遍窗口区域，并且比第一种方法减少了很多乘方的运算。而且，对于 g 值，由于其范围在 $0 \sim 4095$ 之内，因此 \sqrt{g} 运算可以事先做成一个 4096 级的开方值查找表，计算过程中通过查表求值，无需再做开方。对于 s 值，由于 3×3 窗口区域中点的值均是 4096 级的，因此 $s = |\Delta x| + |\Delta y|$ 的值也是在一个很有限的范围内，并且对于 s 值很大的数据点，我们可以认为其已经是边缘而不做灰度抬高的操作。因此 \sqrt{s} 运算同样可以做成一个查找表。这样在计算过程中就可以完全避免耗时的开方运算，节省了时间。图 5-18 是采用第二种抬高方法得到的结果图。

从对比图中可以看出，对于同一包裹图像的左侧灰度较小的区域，原图已经很难分辨出其中的边缘信息了。而使用两种抬亮方法的结果图均比原图有明显的改善，目标区域中能够比较清晰地看到物品的边缘，并且方法作用的结果对包裹图像的非目标区域部分基本没有影响。虽然基于差分的方法较基于均方差的方法在效果上稍弱，但综合计算方法的时间复杂度和效果两方面看，第二种方法还是可行的。

5.4 本章小结

本章首先介绍了伪双能透射系统中，基于 HSL 色彩空间的灰度图像的真彩色颜色赋值算法，然后结合第四章的方法计算出来的物质属性隶属度，对图像进行色彩融合，产生系统最终显示的真彩色行李包裹图像；然后介绍了采用伽马校正改善不同物质的亮度方法，进一步丰富图像的层次感；最后介绍了基于区域平滑程度抬高亮度的方法，作为一种应用于灰度较小区域的边缘增强的补充方法。经过使用本章的伪彩图像处理方法之后，行李包裹图像的显示质量有明显的改善和提高，使得物质辨别更加便捷，图像细节更加清晰。

第六章 现场场景采集及交叉检索

6.1 场景采集及交叉检索功能模块

由于安全检查和打击恐怖主义活动的需要,近年来在民航、铁路、地铁、公共汽车等公共交通运输和人流集中场所,基本上都配备了X射线透射图像安检系统,加强对行李包裹的检查。根据反恐斗争的“事先预防与事后打击相结合”基本对策,其中在民航系统中,花费大量资金配备了“旅客离港安检信息系统”,该系统的基本原理是,将离港旅客的身份资料、航班信息、人像资料、所携带行李的外观和X射线透视图像通过软件处理予以保存,一旦发生恐怖活动便于公安机关及时锁定犯罪嫌疑人,及时打击恐怖主义活动。而我们通过在系统中增加人像和行李包裹相对应的场景视频采集,以及利用自定义的包裹数据和视频的存档格式,用软件进行的交叉检索回放的模块,来扩展系统功能,提高安全性。

主要方案如下:

- 1、在X射线安检设备旁安装CCD或者CMOS摄像机,采集行李包裹携带者的人像视频;
- 2、在X射线安检设备的出口端安装CCD或者CMOS摄像机,采集行李包裹的外观特征影像;
- 3、将采集到的影像数据送到X射线安检设备的计算机(如果采用模拟信号输出的摄像机,则需要在计算机上增加视频采集卡。如果选用USB输出的摄像机,则可以直接通过计算机的USB端口输入计算机。须选用像素较高的机型以保证今后回放的清晰度),按照特定的文件格式存档;
- 4、通过软件实现数据存档与对应行李包裹及人像视频的交叉检索及回放,并实现透射图像与对应视频的精确定位及合成。

安检追踪回放功能模块主要分成两个部分,一是视频采集;二是视频回放。

视频采集部分采用视频采集卡外加双路高清晰度彩色模拟摄像机的硬件配置。视频采集卡为硬件压缩卡,将采集到的视频数据直接压缩成MPEG4的格式保存,减轻了系统CPU的处理负担;而两路摄像机分别选择一路是针孔广角彩色摄像机,采集到的视频图像范围更大;一路是高清晰度枪式彩色摄像机,图像清晰,色彩还原度好。两路摄像机相结合,提高采集到视频的广度和显示质量。图6-1为视频采集模块流程图。

视频检索回放部分主要是软件的工作,实现的功能如下:

- 1、在原有的系统软件中,添加安全检查追踪回放系统界面。输入一定的检索信息,如存档时间段和检查人员的用户名等,根据检索到的行李包裹的历史记录,索引并读入相应的视频文件。
- 2、使用DirectShow技术,播放视频文件(可以同时播放双路或多路视频记录)。可以通过操作控制视频播放的开关、快慢,调节播放画面的大小和方式。
- 3、能够截取播放的视频中的任一画面并存档,便于事后详细分析。
- 4、安全检查追踪回放系统界面实现两路视频和对应的行李包裹“三位一体”的显示方案,使检索观看更加直接、便捷。
- 5、对于较长或者一连串的行李包裹,在播放相应视频时,行李小图随着播放进度自动改变,图像与视频中的行李记录基本一一对应。

图6-2为系统视频检索回放的操作界面。

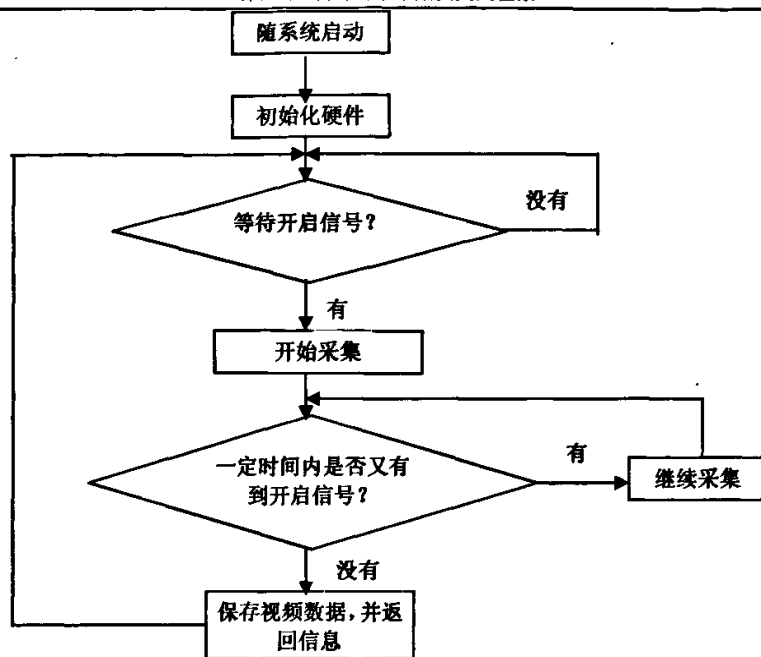


图 6-1 视频采集流程图



图 6-2 视频检索回放操作界面

6.2 本章小结

本章简要介绍了安检系统的现场场景采集及交叉检索功能模块，概述了场景采集所采用的硬件设备，实现的功能，及其流程图。并且介绍了包裹数据与视频数据交叉检索的技术。采用该功能模块的安检系统能够进一步提高其安全性，通过记录和检索视频数据，对危险情况做出迅速的追踪。

第七章 总结与展望

X 射线透射图像安全检查系统是目前 X 射线透射技术最为成熟, 市场应用最为广泛的安全检查设备。其中双能透射系统所具有的物质鉴别准确性高、透射数据稳定性好、图像显示质量较高和操作简便、易于培训掌握等特点, 使得在民航、铁路、车站等公共交通运输和人流集中场所的安全检查更加方便和有效。系统的配备把安检工作人员从最为传统的开包检查的繁重工作中解放出来。并且系统自动检测行李包裹里的物品而无需打开, 既保护了旅客的隐私, 又不会对物品造成损坏, 还大大加快了安检的速度。更重要的是其检测的准确性使得一些危害交通运输和人员安全的活动发生的概率显著降低, 对安全预防和打击恐怖主义活动起着至关重要的作用。

本篇论文主要对伪双能透射系统物质判别的校正物体厚度影响的方法做了较为详细的研究。从 X 射线透射成像系统的原理开始, 逐步介绍整个系统。透射成像的原理包括 X 射线的产生和其光谱特性, X 射线的透射和散射, 以及 X 射线光子与物质的相互作用的规律。

第二部分主要介绍了本论文的实验基础, 伪双能透射图像系统的软硬件的框架和结构。包括原始数据采集部分的结构, 系统数据传输部分的硬件原理, 以及原始数据的管理和预处理。

第二部分阐述了基于传统物质属性计算公式的伪双能透射系统, 在判别物质时的物体厚度效应产生的原理。然后在此基础上扩展物质属性平面, 在更高维的属性空间中, 研究出减小厚度效应的物质属性改进算法, 并且用实验结果验证了新算法的实际应用效果。

第三部分主要介绍几种增强透射图像显示质量的方法。包括基于物质属性隶属度和灰度的真彩色赋值方法, 以及为使不同物质的颜色平滑过渡的色彩融合算法。另外有扩大彩色图像对比度的数字图像处理方法。

第四部分主要就视频追踪和回放功能模块做了简单的阐述。包括视频采集和视频检索回放这两部分的实现方法, 采用的硬件和软件的技术, 以及实现的功能。

到目前为止, 我们参与研制的伪双能 X 射线透射行李安全检查系统 BI 系列已有超过三百台设备在各种应用现场正常使用, 并且取得了较好的市场反映。虽然如此, 我们对于 X 射线透射系统的研究工作仍需要有进一步的发展。今后的研究将更加深入, 包括:

1. 继续提高整个系统的运行效率和稳定性。包括提高系统硬件电路的抗干扰能力, 探测器的探测效率, 和提高运行软件的健壮性, 使整个系统在一定程度上具有自动纠错和出错后自动恢复的能力。
2. 更加深入研究在二维属性空间上的数据点分布规律, 期望找到与系统相适应的更加准确的物质属性计算方法。以及尝试其它属性计算方法。
3. 进一步构造真双能 X 射线透射系统进行物质判别的实验, 期望得到更加精确的数据和更完善的图像显示质量。
4. 构造散射信号检测系统, 期望结合 X 射线散射的相关理论, 就一些高危物质, 如炸药、毒品等作出较为精确的判别。
5. 尝试运用图像处理理论中的模式识别等方法^{[57][59]}, 就一些透射数据或者物体轮廓具有典型性的情况, 使系统自动突出显示这些物体, 进一步提高安检系统的智能性, 减轻检查人员的负担; 并且尝试识别视频数据中的人像和对应的行李包裹。

随着研究工作不断深入, 应用技术的不断提高, 今后的 X 射线透射图像安检系统将更加精确, 更加智能化, 更加便捷。

参考文献

- [1] 李树坦. X射线安检设备中数字图像处理方法的研究与探索[D]. 东北大学硕士学位论文. 2003.2: 3-4
- [2] 刘宇珊. 铁路运输的安全卫士——X射线安全检查仪[J]. 铁道运输与经济. 1997(7): 28,37
- [3] 曹军生, 刘以农, 倪建平. 康普敦散射成像的蒙特卡罗模拟[J]. 核电子学与探测技术. Vol.23, 2003.3: 155-158
- [4] 霍东来, 刘以农. 大型物体前向康普敦散射成像的若干模拟计算结果[J]. 核电子学与探测技术. Vol.22, 2002.7: 377-384
- [5] 汪元美, 王加俊, 张兆田, 张朋. 康普敦散射成像模型及神经网络实现[J]. 浙江大学学报(工学版), Vol.34, 2000.9: 473-477
- [6] 刘太辉, 宋建中. 医用X射线在背散射成像中的应用初探[J]. 吉林大学学报(信息科学版), Vol.21, 2003.8: 64-67
- [7] Schafer David, Swift Roderick D. AS&E CARGO VEHICLE X-RAY INSPECTION SYSTEM[J]. SPIE Vol.2093 0-8194-1366-6/94
- [8] Swift Roderick D. Mobile X-ray Backscatter Imaging System for Inspection of Vehicles[J]. SPIE Vol.2936. 0-8194-2338-6/97
- [9] Benjamin R., Prakoonwit S. Automatic X-ray screening of aircraft hold luggage[R]. IEE Pub. No.437 ECOS97, 1997: 5-9
- [10] Evans J P O, Robinson M and Godber S X. A new stereoscopic X-ray imaging technique using a single X-ray source: the theoretical analysis[J]. NDT&E Int 1996,29: 27-35
- [11] Evans J P O, Robinson M and Godber S X. The Identification of Volume Elements in a 3-D X-ray Imaging System[J]. Electron Lett, 1996, 32,(7): 644-645
- [12] Evans J P O, Robinson M and Godber S X. 3-D X-ray Modelling-Lastest Developments[R]. European Conference on Security and Detection, 28-30 April 1997, Conference Publication No. 437 @ IEE, 1997: 152-156
- [13] Evans J P O, Robinson M. Testing and Evaluation of an Advanced(3-D) X-ray Screening System[R]. Proceedings of 32nd IEEE Intl Carnahan Conference on Security technology, Oct 1998: 50-54
- [14] Heiskanen K, Meyer T., Pillor D., Scheinman E., Wolff S., Roder F. Illicit drug detection using CTX5000[R]. Proc. Counter law enforcement: applied tech. for improved operational effectiveness int. tech symp., Oct. 1995, part 1: 6-33 6-44
- [15] Rober F.L. The evolution of computed tomography(CT) as an explosives detection modality[R]. Proc of the first international symp. On explosive detection technology, FAA Tech.Center, Atalntic City International Airport, Feb. 1992: 297-308
- [16] Liu Wenye. Automatic detection of elongated objects in x-ray images of luggage[D]. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997: 1-2
- [17] Lu Qiang. The Utility of X-Ray Dual-Energy Transmission and Scatter Technologies for Illicit Material Detectin[D]. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999: 1-2
- [18] Shi Xinhua. Improving Object Classification in X-ray Luggage Inspection[D]. Blacksburg, Virginia: Virginia

Polytechnic Institute and State University, 2000: 1-2

- [19] 许祖润. X和 γ 射线成像阵列探测器[J]. 核电子学与探测技. Vol.20: 62-65
- [20] Shi Xinhua. Improving Object Classification in X-ray Luggage Inspection[D]. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000: 27-28
- [21] 孙丽娜. X射线安检设备中物质分类识别方法的研究[D]. 东北大学硕士学位论文. 2003.2: 22-23
- [22] 王元熙. X射线及X射线衍射[M]. 高等教育出版社. 1988.8: 201-203
- [23] 杨家福. 原子物理学[M]. 高等教育出版社. 1990.4: 280-285
- [24] 王进, 舒华忠, 鲍旭东. 单源双能量X射线安全检查系统[D]. 东南大学硕士学位论文. 2005.3: 5
- [25] Selman, J. The fundamentals of x-ray and radium physics[J]. Physics, 1994: 43-57
- [26] 庄天戈. CT原理及算法[M]. 上海交通大学出版社. 1992.7: 22-25
- [27] Shi Xinhua. Improving Object Classification in X-ray Luggage Inspection[D]. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000: 36
- [28] 蓝牙适配器术语详解 传输速率. [EB/OL]. <http://publish.it168.com/CWORD/2356.shtml>
- [29] 张弘. USB接口设计[M]. 西安电子科技大学出版社. 2002: 1-7
- [30] 布坎南(美). PC接口通信与Windows编程[M]. 中国电力出版社. 2001: 83-85, 152-154
- [31] 王进, 舒华忠, 鲍旭东. 单源双能量X射线安全检查系统[D]. 东南大学硕士学位论文. 2005.3: 18-20
- [32] Oppenheim Alan V, Willsky Alan S, Nawab S Hamid, 刘树棠 译. 信号与系统(第二版)[M]. 西安交通大学出版社. 1998.3: 371-374
- [33] 康克军, 刘胤兵, 陈志强. 集装箱检查系统中的阵列探测器校正[J]. 清华大学学报(自然科学版). Vol.42, 2002: 573
- [34] 靳晖, 程建平, 陈志强, 张丽. 移动式大型集装箱检测系统图像校正与放大研究[J]. 核电子学与探测技术. Vol.21, 2001.3: 151-153
- [35] 冈萨雷斯. 数字图像处理(第二版)[M]. 电子工业出版社. 2002: 66-67
- [36] H奈茨 主编. 数学公式[M]. 海洋出版社. 1983: 61-62
- [37] 王进, 王睿, 夏婷, 鲍旭东, 舒华中. 单源双能量X射线物质辨别方法研究[J]. 传感技术学报. 2005, Vol.18: 436-438
- [38] N.A.Dyson. X-rays in atomic and nuclear physics[M]. London: Longman Publishing Company, 1990: 40-45
- [39] Krauss, R.A. Signature of explosives by elemental composition analysis[J]. Proceeding of Second Explosive Detection Symposium & Aviation Security Conference, 1996: 18-25
- [40] Gingold E.L., Hasegawa B.H.. Dual-Energy X-ray Processing for Quantitative Projection Imaging[J]. 90CH2975-1/90 1990 IEEE: 52-55
- [41] Shi Xinhua. Improving Object Classification in X-ray Luggage Inspection[D]. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000: 126-132
- [42] 孙丽娜. X射线安检设备中物质分类识别方法的研究[D]. 东北大学硕士学位论文. 2003.2: 63-67
- [43] 王进, 舒华忠, 鲍旭东. 单源双能量X射线安全检查系统[D]. 东南大学硕士学位论文. 2005.3: 31-33
- [44] 孙志忠, 袁慰平, 闻震初. 数值分析(第二版)[M]. 东南大学出版社. 2002.2: 190
- [45] Donald Hearn, M. Pauline Baker 著, 蔡士杰 等译. 计算机图形学(第二版)[M]. 电子工业出版社. 2002.5:

- [46] 何斌, 马天予, 王运坚, 朱红莲. Visual C++ 数字图像处理[M]. 人民邮电出版社. 2001.4: 305
- [47] 孙正兴, 周良, 郑宏源编著. 计算机图形学基础教程[M]. 清华大学出版社. 2004.2: 38-40
- [48] David F. Rogers(美) 著, 石教英, 彭群生 等译. 计算机图形学的的算法基础[M]. 机械工业出版社. 2002.1:478-483
- [49] 向世明. Visual C++ 数字图像与图形处理[M]. 电子工业出版社. 2002.6: 266-267
- [50] 冈萨雷斯. 数字图像处理(第二版)[M]. 电子工业出版社. 2002: 63-66
- [51] Kenneth R.Castleman 著, 朱志刚, 林学闫, 石定机 译. 数字图像处理[M]. 电子工业出版社. 1998.9: 150
- [52] Gonzalez Rafael C., Woods Richard E.著, 阮秋琦, 阮宇智 译. 数字图像处理(第二版)[M]. 电子工业出版社. 2003.3: 59-66
- [53] 何斌, 马天予, 王运坚, 朱红莲. Visual C++ 数字图像处理[M]. 人民邮电出版社. 2001.4: 394
- [54] 章毓晋. 图像分割[M]. 科学出版社. 2001: 9-19
- [55] Paranjape R., Sluser M., Runtz K. Segmentation of Handguns in Dual Energy X-ray Imagery of Passenger Carry-on Baggage[J]. IEE Proc Vis Image Signal Process Vol. 72 No.2 April 1998: 377-380
- [56] Thai T. Segmentation of x-ray images using probabilistic relaxation labeling[J]. Proc. 1st Int. Symp. Explosives Detection Tech., Ed:S. Khan, Nov, 1991: 120-125

致 谢

首先非常感谢我的导师，鲍旭东教授。在我的研究生的学习和课题研究中，他给了我最大的关怀和指导，我的学业的完成和研究的成果离不开他对我的帮助。同时也感谢鲍老师给我参与 X 射线透射系统项目的研究这样一个学习和锻炼的机会，并且在项目研究的过程中，对我每一次的悉心指导和能力的培养。鲍老师给予我的帮助使我受益匪浅。同时鲍老师严谨的治学态度和渊博的专业知识也给我留下了最为深刻的印象。

非常感谢电子工程系的朱为教授，在完成与系统硬件相关的数据传输软件的过程中，是他不断给我支持和指导，并且在关键问题上组织组员一同讨论解决，并给出很多解决建议。同时感谢影像科学与技术实验室的罗立民教授，於文雪副教授和李松毅等老师在整个研究生阶段给予我的无私帮助。

特别感谢东影公司的王进，他是我的师兄，也是这个系统的最主要的构建和完成的人。感谢他在项目研究中给予我的指导和鼓励。踩着师兄的脚步，我学到了很多。同时也感谢安检项目组的所有同学，葛金鹏、葛军以及还有电子工程系负责硬件部分的所有组员，周其伟、达炎、伍玉萍、刘兆年等等，他们有的是师兄师姐有的是我的同学，在研究生阶段的学习和研究过程中，大家同甘共苦，互相帮助，才有了今天项目的进展和我们的进步。感谢大家的努力。

同时非常感谢我的同学，朱鹏、钱海勇、陆银城、李剑、郑洪哲、马汉林、石祥林等等，他们同样是实验室其他项目的成员，感谢在这两年多的日子里，无论是生活上，还是在学习研究上，大家互相帮助，一同走过的道路，一起分享的经历！

同时也要感谢同在实验室的师兄和师姐们，杨奎、郑国春、朱杨兴、刘彦鹏、唐惠等等，是他们给了我学习的榜样，也给了我无私的帮助。

还要感谢上海东影公司的员工，在现场调试的时候给我的帮助和支持。

特别感谢我的父母，是你们对我的关爱伴随着我的每一步成长，感谢你们为我所做的一切！

最后，衷心感谢所有关心我和帮助我的人，祝福你们！

徐明刚
2006 年 12 月 4 日