

## X 射线安全检查技术综述

王琪, 陈志强, 邬小平, 王学武, 张丽, 康克军  
(清华大学工程物理系, 北京 100084)

**摘要:** 近年来, X 射线安全检查技术受到航空安全等需要的驱使, 得到迅速发展。本文对国内外现有的用 X 射线探测行李中的爆炸物和其他违禁品的几个主要方法做了一个回顾, 阐述了用单能法、双能法、双视角、散射、计算机断层成像法和立体匹配分层成像法进行物质识别的基本原理, 并对各种方法的优缺点作了比较和讨论, 最后对 X 射线安全检查技术的未来发展前景进行了展望。

**关键词:** 计算机断层成像; 安全检查; 物质识别; 双视角;

中图分类号: P391.5 文献标识码: A

## Review of X-ray Security Inspection Technology

WANG Qi, CHEN Zhi-qiang, WU Xiao-ping, WANG Xue-wu, ZHANG Li, KANG Ke-jun  
(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In these years, x-ray security inspection technology is developing rapidly due to the needs of airport security. This paper reviews the main techniques of using x-ray to inspect exploder and other contraband. It describes the methods of material recognition in single energy system, dual energy system, dual view system, scatter system, CT and stereo matching technique. Then we make a discussion and comparison among these methods. Lastly it gives foreground of the x-ray security inspection technology.

**Key words:** CT; Security inspection; material discrimination; dual view system

## 1 引言

从七十年代初开始, 对通过重要出入口(如机场、港口、车站、海关等)的人员所携带的行李物品实施安全检查已成为国际上广泛采用的安全措施。在各种检查手段中, 低成本、低剂量、非接触式、可成像的 X 射线安全检查设备的应用最为普遍。该设备是一种利用 X 射线的穿透能力实现对行李、货物进行快速不开箱检查的系统。

## 2 X 射线安全检查技术的发展

### 2.1 单能 X 射线技术

单能 X 射线扫描是违禁品检查领域最基本的、也是最早得到广泛应用的方法。直至目前, 它还是许多小型 X 射线扫描检查系统的标准配置。

\*收稿日期: 2003-12-12。国家自然科学基金资助项目, 项目编号 10135040。

小型 X 射线扫描检查系统通常主要由 X 射线发生器、准直器、L 型探测器阵列、通道、传送装置和箱体组成。如图 1 所示。

系统工作时, 传送带将被检查邮件或包裹送入通道, 系统产生的 X 射线经过准直器后成为很薄的扇形射束穿过传送带上的物体, 探测器接收各种材料吸收时产生的 X 射线信号, 经过晶体及光电二极管转变为反应物体吸收特性的相应电信号, 经后序电路特殊处理形成图像信号, 并在显示器上显示。



图 1 X 射线扫描检查系统组成示意图

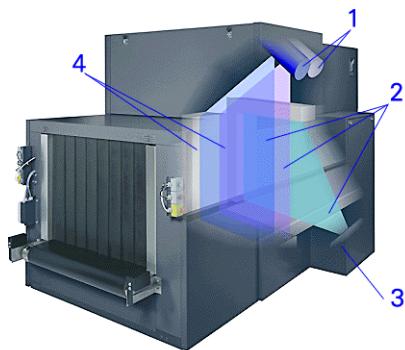


图 2 双视角 X 射线检查系统示意图

- |  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| 1-垂直 X 射线发生器<br>vertical X-ray generators  | 2-X 射线扇形束<br>fan shaped X-ray beams  |
| 3-水平 X 射线发生器<br>horizontal X-ray generator | 4-垂直探测器阵列<br>vertical detector lines |

## 2.2 双能 X 射线技术

随着安全检查、违禁品检查要求的提高, 对检查系统物质识别功能的要求越来越迫切, 双能量技术逐渐得到广泛应用, 采用双能量技术的设备已经成为 X 射线扫描检查系统的主流设备。

在具有连续谱的 X 射线情况下, 最高能量分别为  $E_h$  和  $E_l$  的高、低能射线穿过有效原子序数为 Z, 厚度为 t 的物质时, 可定义高、低能透明度  $T_{Eh}$ 、 $T_{El}^{[1, 2]}$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{Eh} = \frac{\int\limits_0^{E_h} N(E) e^{-m(E, Z)t} P_d(E) EdE}{\int\limits_0^{E_h} N(E) P_d(E) EdE} \\ T_{El} = \frac{\int\limits_0^{E_l} N(E) e^{-m(E, Z)t} P_d(E) EdE}{\int\limits_0^{E_l} N(E) P_d(E) EdE} \end{array} \right. \quad (1)$$

其中:  $N(E)$  表示能量在  $E$  和  $E+dE$  之间的光子数;  $m(E, Z)$  为物质的线性衰减系数;  $P_d(E)$  表示能量为  $E$  的光子的探测效率;  $E$  为光子能量。显然, 直接求解上面的非线性方程组得到 Z 是很困难的。为了量化估计 Z, 一系列具有已知衰减系数、原子序数覆盖整个 Z 范围的参考

材料被选为一组插值点:  $z = \{Z_0, Z_1, \dots, Z_{n-1}\}$  (2)

对于未知的  $Z_{\text{exp}}$ , 可以通过两步得到。

首先利用 S. Ogorodnikov 在参考文献[4]中给出的公式来估计未知  $t_{\text{exp}}$ :

$$\frac{T_{2\text{exp}} - T_2(Z_i, t)}{T_2(Z_{i+1}, t) - T_2(Z_i, t)} = \frac{T_{\text{exp}} - T_1(Z_i, t)}{T_1(Z_{i+1}, t) - T_1(Z_i, t)} \quad (3)$$

然后, 利用相邻点  $Z_i$  点和  $Z_{i+1}$  的透明度的距离(简称欧氏距离), 根据下式插值原子序数  $Z_{\text{exp}}$ :

$$Z_{\text{exp}} = Z_i + (Z_{i+1} - Z_i) \cdot \sqrt{\frac{(T_{2\text{exp}} - T_2(Z_i, t_{\text{exp}}))^2 + (T_{\text{exp}} - T_1(Z_i, t_{\text{exp}}))^2}{(T_2(Z_{i+1}, t_{\text{exp}}) - T_2(Z_i, t_{\text{exp}}))^2 + (T_1(Z_{i+1}, t_{\text{exp}}) - T_1(Z_i, t_{\text{exp}}))^2}} \quad (4)$$

其中, 原子序数插值的精度依赖于参考材料(2)所表达的数目<sup>[3,4]</sup>。

### 2.3 双(多)视角 X 射线技术

为了解决双能设备所得到二维图像在分辨重叠结构上的不足, 多视角设备成为具有爆炸物、毒品检查功能的增强机型。

多视角系统利用不同角度的照射, 克服单视角下重叠物品无法区分的弊病。另外可使用 2 个或 3 个视图重建被测物体的 3 维视图, 从而可以获得更精确的有效原子序数和有关密度的更多信息<sup>[5]</sup>。

### 2.4 散射技术

X 射线背散射方法是同时获取透射图像和背散射图像, 获取双视角的方法。透射图像类似通用系统的标准的 X 射线图像, 背散射图像提供行李包靠近表层的内容物的信息。这意味着来自浅层区材料的 Z 信息比透射双能量系统中的信息丰富、灵敏。这种方法对探测靠近行李表层的爆炸物具有特别重要的意义。

X 射线散射技术主要针对低原子数物质检查。传统的 X 射线检查系统中检查低原子数材料如塑料武器、爆炸物、毒品和有机物时, 由于物质之间的反差小, 在图像中就会出现大块明亮的白色, 需要在另一个监视器中降低干扰进行检查。而散射 X 射线则利用这类物质的辐射散射特征系数与高原子数材料不同, 除了传统的射线源和探测器外, 再在探测器或射线源一侧多安装一个探测器, 检测低原子数物质散射的 X 射线强度, 获得的数据和图像与透射获得的数据和图像进行比较。

### 2.5 计算机断层成像技术

X 射线方法的终极发展是计算机断层成像技术, 通常被称为 CT (Computer Tomography) 成像技术。它的工作过程概括起来是这样的: 首先通过对三维物体的某一截面进行扫描, 采集与物体截面结构相关的数据集合, 然后再对这些数据集合根据一定的数学原理进行逆运算而获取与物体截面结构一一对应的参数值, 最后通过显示技术从参数值来最终恢复物体的截面图像。这个图像便是断面图像, 其中所需的大量运算则由计算机实现。

用 CT 来重建图像的过程可以用下面的框图表示。首先是数据的采集, 也就是投影值的采集, 这里需要采集两种数值, 一种是定标测量值, 也就是校准值, 另一种是实际测量值; 然后就是对各种采集数据的处理, 包括多能量的数据计算、射束硬化的处理; 接着再通过各种重建的算法来把投影值转化为各处的线性衰减系数(相当于 CT 数); 最后是将线性衰减系数转化为图像显示的像素, 从而在计算机上显示出图像来。

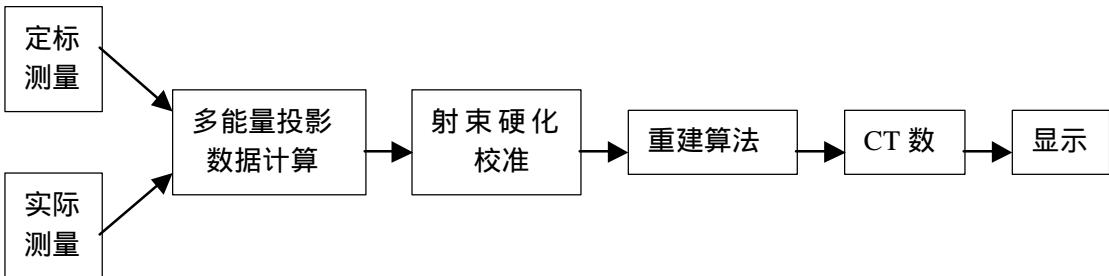


图 3 CT 重建过程框图

此项技术具有多视角、极高的分辨率、提供三维密度信息等功能。当密度显得极端的重要时，附加的双能量可以获得精确的 Z。但是它需要处理的数据量巨大，获得图像的时间因而比其它系统长得多。

## 2.6 立体匹配分层成像技术

获得三维信息的另一种手段是立体匹配技术。这是一门起源于上世纪六十年代，到八十年代取得迅速发展的技术。它通过对同一物体在不同视角下进行立体摄影获得的图像进行匹配，从而得到物体的深度信息。

立体成像模型见下图：

设有不同深度的 A, B 两点，则在右探测器扫描图像中 B 在 A 右，在左探测器扫描图像中 B 在 A 左，两点的相对位置差为 L，由 L 和张角  $f/2$  可以得到 A, B 两点深度差 H:

$$H = \frac{L}{2 \tan \frac{f}{2}} \quad (5)$$

当射线束夹角  $f$  很小时  $H \approx \frac{L}{f}$ ，即物体相对深度与物体左右两幅图像的相对位置差成正比。

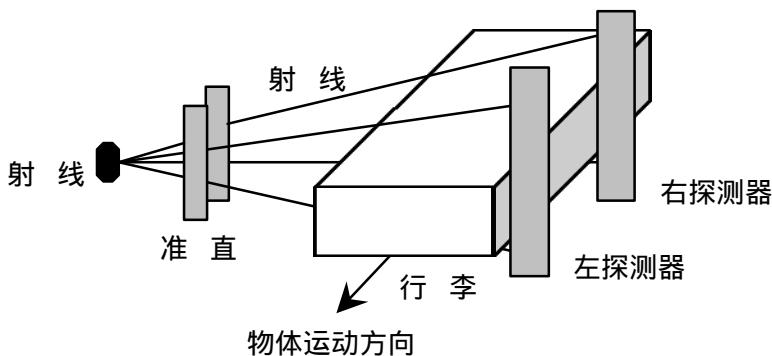


图 4 射线扫描立体辐射成像原理示意图

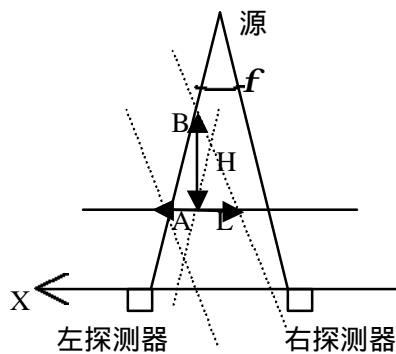


图 5 立体辐射成像几何结构示意图

### 3 各种技术的优缺点

各种技术的优缺点可以通过下表得到对比。

表 1 各种方法优缺点对比表

	优点	缺点
单能 X 射线技术	技术简单成熟，价格低廉。	不能分辨复杂背景中相对量少或隐藏在高 Z 物质后的非法物品。
双能量 X 射线技术	与单能 X 射线扫描检查系统相比，采用双能量 X 射线能获得被检物的有效原子序数信息，提高系统的物质分辨能力。	不能分辨复杂背景中叠放的物体，不能测定物质的浓度，因此就不能准确的测定原子序数。
双视角 X 射线技术	多视角使操作者更容易判别被检物品。	成本提高，辐射剂量大，三维视图的重建还存在许多问题。
散射技术	可以检测低 Z 高密度有机物。	散射后能量降低的光子很容易与高 Z 物质发生光电效应而衰减，因此放在高 Z 物质后的低 Z 物质仍无法检测。
计算机断层 CT 技术	CT 能测定物质的厚度，同时能够将爆炸物和其它低原子数的类似物质区分开来，因此目前灵敏度和准确率最高。	技术复杂、造价高、照射剂量大、检查速度慢。目前正在探索降低 CT 系统的复杂性和造价，如开发双能量和旋转扫描系统。
立体匹配分层技术	技术简单，成本低，成像时间短。	得到的三维信息是不完全的和近似的。缺乏技术成熟、应用广泛的算法。

### 4 对于未来发展的讨论

随着科学技术的发展，犯罪分子和恐怖分子利用高新技术，制造新的爆炸物，如利用集成电路技术制造的高精密炸弹、塑性炸药、“邮件炸弹”及许多毒品等，传统检测手段就无能为力。因此，世界各国都在探索研制机场安全检查的新技术、新设备。除了 X 射线技术，还包括热中子分析 TNA (Thermal Neutron Analysis)，核磁共振 NMR (Nuclear Magnetic

Resonance), 蒸气微粒探测 VD (Vapor Detection)。今后 X 射线安全检查技术仍然是一个非常活跃的研究领域,许多理论与应用还有待我们去研究,安全检查保卫着人类和平生活。

## 参考文献

- [1] SHI Xinhua. Improving Object Classification in X-ray Luggage Inspection[D]. "Ph.D dissertation", Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000, 64-65.
- [2] Novikov V L, Ogorodnikov S A, Petrunin V I. Dual energy method of material recognition in high energy introspection systems. [C] Proc. 16th International Workshop on charged particle linear accelerators, 1999, Alushta, Crimea, Ukraine, appeared in ESSN 1562-6016, Problems of atomic science and technology, 1999, v.4, 93.
- [3] Ogorodnikov S, Petrunin V, Vorogushin M. Radioscopic discrimination of materials in 1-10Mev range for customs applications. [C] Proceedings of European Particle Accelerator Conference 2002, Paris, France, 807-2809.
- [4] Ogorodnikov S, Petrunin V. Processing of interlaced images in 4-10Mev dual energy customs system for material recognition. [C] Proceedings of the 6th International Computational Accelerator Physics Conference, 2000, Darmstadt, Germany.
- [5] Vorogushin M F, Ogorodnikov S A, Petrunin V I. Experiments on material recognition for 8 Mev customs inspection system for trucks and large-scale containers. [C] International Linac Conference, 2000, Monterey, California, 642-644.

**作者简介:** 王琪(1979—)女, 2001 年毕业于清华大学工程物理系, 现在清华大学工程物理系继续攻读博士学位, 从事工业 CT 检测研究。Email: wangqi97@tsinghua.org.cn

\* \* \* \* \*

## 2004 年中国体视学学会 - CT 和三维成像学术会议征文通知

中国体视学学会 CT 理论与应用分会 (CSSCT) 和清华同方威视技术股份有限公司主办、《CT 理论与应用研究》编辑部协办, 并欢迎有关单位参加主办、协办, 将于 2004 年 10 月 10 日前后在北京市开会: 研讨“21 世纪科技进步与 CT 及三维成像理论与应用, 交流国内外 CT 和三维成像的理论、应用技术的成就和展望”。会议分 5 项议题: Symp1: CT 理论、计算方法和软件: 显微 CT、锥束 CT 成像理论和算法; Symp2: 工业 CT 和数字扫描成像、新型 CT 机和微焦点 CT 的设计和性能, 信息反馈工程和其他应用; CT 与 NDT 在线检测; Symp3: 医学 CT 扫描成像诊断: 高质量 CT/MRI/PET 扫描仪的设计和在应用; 三维定位、仿真内窥镜的软件制作; 手术模拟和介入导航; 多种影像信息的融合, 互补, 配准和远程传输; Symp4: 地球层析理论和技术: 地震层析成像; 地下电磁断面成像; 3D 动态成像在预测强震及地下水等中的应用; 探地雷达 GNR 探测地下文物、水工、土木工程检测; Symp5: 三维成像及应用: 体视学和 3D 成像的理论和方法等。同时, 针对社会和企业的需要, 举办: “CT 和体视科技创新与应用高级论坛”及展览会: 约 20 项先进技术。

筹办进程: 评议和录用论文, 特邀在大会和专题研讨会场作主题发言, 在展版上作图表展示等; 经学会专家评优的论文将发给优秀论文证书, 及奖品, 推荐给有关刊物发表。论文格式: 论文用 B5 页面打印。国内作者请提交中、英文摘要对照稿。欢迎将全文以 Word 的形式存入软盘寄给 100081 北京民族大学南路 5 号 CT 理论与应用研究编辑部, 或电子邮件发往: [glct@cea-igp.ac.cn](mailto:glct@cea-igp.ac.cn) 论文摘要截止时间: 2004 年 7 月 30 日。其他详见第 1, 2 号通知。