

CT 技术在安检领域的应用

吴万龙, 李元景, 桑 斌, 何文俊, 李玉兰

(清华同方威视技术股份有限公司, 北京 100084)

摘要: 本文阐述了 CT 技术检测爆炸物的基本原理, 并结合当前的国际安全局势的现状, 对其在爆炸物检测领域中的应用和发展现状作了详细介绍。

关键词: 计算机断面成像; 爆炸物; 安全鉴定; 密度; 探测

中图分类号: TP 335

文献标示码: A

Application of Computed Tomography in Explosives Detection

WU Wan-long, LI Yuan-jing, SANG Bin, HE Wen-jun, LI Yu-lan

(Nuctech Company Limited, Beijing 100084, China)

Abstract: The principles of the computed tomography are introduced in this paper, the applications and development of CT technologies in explosives detection are also explored.

Keywords: CT; explosive; FAA authentication; density; detection

1 引言

CT 技术自从本世纪 70 年代问世以来, 由于其在物质探测方面有着巨大的优势, 在医疗、工业、军事、地质等行业得到了广泛的应用。随着世界范围内的各类恐怖袭击事件的不断发生, 爆炸物检测领域正在成为 CT 技术应用的一片新天地。在这个特殊的市场中, CT 技术不仅得到了应用, 而且有了新的技术创新动力和市场驱动源泉。国际上已有该类产品问世并投入实际运行, 相关的政府机构也出台了一系列的认证标准。本文介绍了近年来世界范围内爆炸物检测领域的市场背景。在详细的描述了 CT 技术的基本原理和应用领域后, 结合当前市场的发展状况, 介绍了 CT 技术在该领域的应用前景和技术发展趋势。作为检测爆炸物的一个有效手段, CT 技术将在国际安全领域发挥重要的作用。

2 爆炸物检测领域行业分析

近年来, 受动荡的世界格局的影响, 公共安全越来越成为各国政府关注的焦点。恐怖事件在全世界范围内以各种形式不断发生。2001 年 9 月 11 日美国纽约世界贸易中心发生骇人听闻的“9.11”事件, 造成数千人丧生, 经济损失更是难以估量。2004 年 2 月俄罗斯发生地铁爆炸案, 死亡人数过百; 2004 年 3 月, 西班牙发生震惊世界的马德里火车站爆炸案, 死亡人数超过 200 人。这一系列事件都表明了恐怖活动是全世界各国政府都必须密切关注的问题。

为对付日益猖獗的恐怖活动, 各国纷纷出台相应政策。1974 年美国国会通过了反劫机

行动法案,要求美国联邦航空局(FAA)在航空安全领域开展研究、开发计划,反对恐怖威胁。1991 ~ 1996 年期间,美国 FAA 投资约 1.5 亿美元用于探测爆炸物技术的研发。“9.11”恐怖袭击事件之后不久,美国国会就通过了《机场和运输安全法案》,并决定机场安检工作由联邦政府直接管辖。该法规定在旅客登机之前,必须要保证每一件将运上美国航班的行李都接受爆炸物检测。

但是由于爆炸物种类繁多,且物质形态也千差万别,因此单纯采用传统的 X 射线辐射成像法难以快速有效的进行分辨。目前国际上爆炸物检测技术的研究主要集中在 X 射线技术、热中子分析、核四极矩共振及蒸气微粒探测等方向,其中以 X 射线技术为基础的 CT 型爆炸物检测研究及应用相对更为成熟。

爆炸物检测领域是一个全球范围内的巨大市场,每年由于恐怖主义活动的始终存在,这个市场的需求量有不断上升的趋势。CT 技术作为一项相对成熟的技术,是爆炸物检测领域解决方案中的重要环节。据德国 schleifring 公司统计,自 2001 年起至现在,CT 型爆炸物检测设备全球需求量平均每年为 1500 台以上,并且还将进一步提高。

3 CT 技术原理

CT (Computed Tomography),即计算机断层扫描技术,其最初的思想要追溯到 1917 年奥地利数学家 Radon 的贡献,而当代的投影图像精确重建的数学方法是由美国物理学家科玛克(Cormack)于 1964 年确立的^[1]。

3.1 CT 的物理和数学模型

取一理想的 X 射线源和探测器,在两者之间放置被检物体。测量 X 射线源的强度 I_0 以及经过物体衰减后的强度 I ,假定物体分段均匀,且各部分的衰减系数分别为 μ_i ,对应厚度为 d_i ,则有下式成立(见图 1):

$$I = I_0 e^{-\sum_{i=1}^n d_i \mu_i} \quad (1)$$



图 1 射线穿过不均匀物质的吸收规律

第一代 CT 机的数学原理示意图,见图 2 所示。由于待测物体不均匀,因此吸收系数 m 沿不同部位的变化可看作 x, y 的函数,即 $m(x, y)$ 。其中, x, y 代表断层平面的一个固定的直角坐标系, x 为平移扫描方向, y 为射线束方向。当旋转一个 Δj 后,第二个直角坐标系 x_1, y_1 和原来选择的第一个坐标系处于同一平面,原点相同。在第二个直角坐标系中,仍以 x_1 方向为平移扫描方向, y_1 方向为射线束方向。

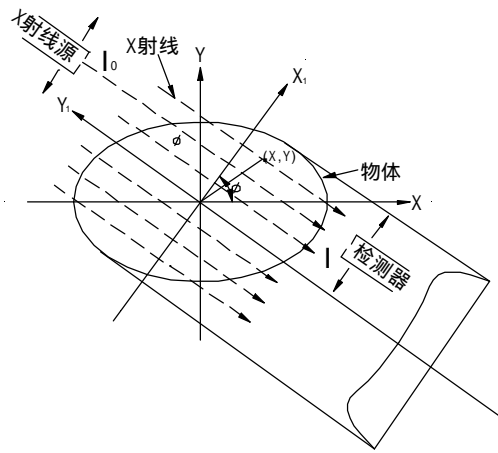


图 2 CT 的数学原理

当射线源和探测器围绕固定待测物体旋转时,在某一旋转角度 j 下,在水平位置 x' 上,探测到的射线强度为:

$$I(j, x') = I_0 \exp(-\int m(x, y) dy') \quad (2)$$

将 (2) 式改写为:

$$\ln(I_0 / I(j, x')) = \int m(x, y) dy' \quad (3)$$

等式 (3) 的左侧含有已测得的 I 和 I_0 值,而等式右侧含有未知量 m 。此时的工作是要从一个线性积分方程中解出未知数 m 。如何求解 m ,这就是 CT 中的图像重建问题。

由于涉及到大量的运算,只有在计算机问世后才得以广泛应用,因此被称为计算机断层扫描技术,这个反演的过程就是三维重建算法技术,包括变换法和迭代法。变换法中的卷积反投影法为当前普遍采用的一种重建算法。

3.2 三维成像

CT 技术得到数据是断层的二维图像,但在实际应用中往往希望得到物体的三维结构图像。三维成像技术可以分为两大类,一类是真三维重建技术,即直接从投影数据进行三维重建,其理论可以参考 Alschuler 的专著^[2];另一类是将多幅二维 CT 图像叠堆出被检物体的三维结构,这实际上是一种显示技术,即如何利用有限的断层数据得到更加接近实际的光滑物体表面。滑环连续螺旋扫描方式的出现,对三维显示技术提供了有力的支持。

3.3 分辨率

CT 图像的质量通常可以用空间分辨率和密度分辨率两个量来表征^[3]。

空间分辨率是 CT 系统鉴别和区分物体结构微小差别能力的度量,它定量的表示能分辨两个细节特征的最小间隔。通常射线源焦点和探测器的尺寸越小,射线束有效宽度越小,这系统的空间分辨率越高。最新 CT 系统的空间分辨率已达到了 0.3mm 以下。

密度分辨率表征 CT 图像再现材料密度变化的能力,通常用图像上可以识别的最小物体对比度定量。密度分辨率与空间分辨率是相互制约的,在辐射剂量一定的情况下,空间分辨率高,则密度分辨率低,反之亦然。

此外,医用 CT 中,由于生物体的运动效应,还有时间分辨率(temporal resolution)的概念。

3.4 伪影

伪影是与物体的物理结构不相符合的图像特征。由于 CT 图像上的每一点都是经过大量的运算得到的,因此对微弱的信号误差也十分敏感。引起伪影的原因主要有两大类:一是与 CT 本身的技术原理有关;二是与 CT 设备的硬件工艺水平及软件技术有关。以下是常见的引起伪影的原因及其克服方法:

- ✧ 部分体积效应:减小扫描层厚度;对图像进行光滑滤波处理;
- ✧ 射线硬化:预先滤波法;双能量校正法;
- ✧ 采样数据不足:增加采样次数;
- ✧ 射线散射:使用准直器控制射线束宽度;
- ✧ 环形伪影:调整数据采集、探测器、X 射线球管、滤波器等部件及其模型校准数据。

4 CT 技术的发展及其在爆炸物检测中的应用

4.1 CT技术在医学领域的应用

CT技术自问世以来首先在医学领域得到了广泛的应用。

1971年9月,英国EMI公司中心研究室主任豪斯菲尔德(Hounsfield)研究成功第一台用于临床的头颅XCT机。医用CT经历了五代发展过程,其主要目的都是为了提高图像的清晰度,降低数据获取时间,降低由投影数据到建立图像矩阵的时间,以及减小检查过程中的剂量。

鉴于计算机断层装置在医学上的重大贡献,豪斯菲尔德博士(英国)和科玛克博士(Cormack)(美国)获得者1979年诺贝尔医学奖。

经过短短三十多年,医用CT技术已经发展到了第五代,扫描方式也从第一代的笔束射线源平移/旋转方式发展到了目前的多层螺旋扫描方式。多层CT扫描速度较常规CT有大幅度提高,以西门子最新的64层螺旋CT——SOMATOM Sensation 64为例:

西门子医疗系统集团在2004年5月7日首次对外发布了全球第一组64层CT的临床图像,这组图像是在弗里德里希-亚力山大大大学德国爱尔兰根-纽伦堡分部采集。

该设备每次在超大范围旋转时,都能捕捉到亚毫米级的图像,其机架旋转速度为0.37秒,得到的心脏、神经和身体图像,其空间分辨率达到0.4mm。现在最快的超高速CT(UFCT)设备单圈扫描时间更是缩短到了数十个毫秒。准确而高效的优点使得CT已经成为医疗诊断的重要手段。

医疗 CT 的特点是:

- 1)检查对象主要为人体器官,采用低能射线;
- 2)以成像为主,关注空间分辨及图像质量;
- 3)在结构上,采用人体平移、射线源和探测器旋转的扫描方式(图3中箭头2),扫描速度要求很高;
- 4)检查结果以人工分析为主。

4.2 CT技术在工业领域的应用

CT 技术的另一个成熟应用是在工业上进行无损检测。七十年代末, CT 技术开始被投入于工业应用研究; 八十年代初, 美国研制专门应用的工业 CT 系统, 检查对象主要针对大型固体火箭发动机和小型精密工件。

与医疗 CT 相比, 工业 CT 的主要特点是:

- 检测高密度和大尺寸物体, 因而采用较高能量的 X 射线源; 以成像为主, 关注空间分辨及图像质量;
- 在结构上, 主要由被测物体完成扫描运动 (图 3 中箭头 1), 扫描速度要求不高; 检查结果以人工分析为主。

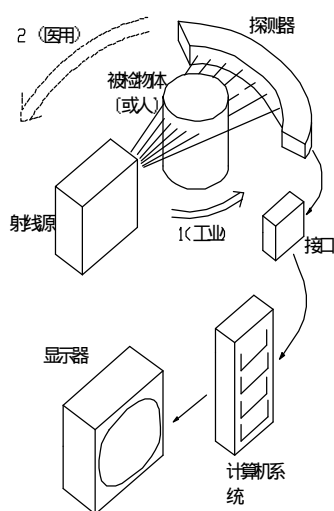


图 3 射线 CT 装置示意图

4.3 CT技术在爆炸物检测中的应用

随着公共安全越来越受到各国政府的关注, 安检产品正在逐步成为 CT 技术应用的新领域。九十年代初, 美国在医学 CT 扫描器的基础上开始研制爆炸物检查系统(Explosive Detection Systems, EDS), 并于 1994 年推出第一台 CT 型 EDS 产品, 该系统类似于医疗 CT, 所要面对的是千差万别的行李物品, 因此在硬件组成上包括 X 光机、探测器、电子学系统等都有着其自身的特点。

采用 CT 技术的爆炸物检测装置具有很强的密度分辨能力和空间分辨能力, 由于大部分的爆炸物的密度是确定的 (在 $1.5\text{--}3\text{g/cm}^3$ 范围内), 结合其空间形状信息, CT 可以准确地发现并定位行李中隐藏的爆炸物。表 1 列举了常见的爆炸物属性^[4]。

CT 装置将测量所得的可疑物密度值与事先预存在数据库中的已知爆炸物的密度值进行对比, 一旦发现两者相符就发出警报, 实现智能分析及报警功能。

与医疗 CT 与工业 CT 相比, 安检 CT 的主要特点是:

- 被检物种类复杂，多为体积较小的物品，采用低能量的 X 射线源；以成像为主，同时关注空间分辨、图象质量及密度识别；在结构上，采用被检物平移、射线源和探测器旋转的扫描方式，扫描速度要求高；系统具有智能分析及报警功能，辅以人工分析。

表1 常见的爆炸物种类及其参数

名称	分子量	密度 (g/cm ³)
TNT (梯恩梯)	227. 3	1. 65
BDX (黑索金)	222. 26	1. 83
HMX (奥克托金)	296. 16	1. 96
Tetryl (特屈儿)	287. 15	1. 73
PETN (泰胺)	316. 2	1. 78
NG (硝化甘油)	227. 09	1. 59
EGDN (乙二醇二硝酸脂)	152. 1	1. 49
AN (硝铵)	80. 05	1. 59
TATP	222. 23	1. 2
DNB (二硝苯)	168. 11	1. 58
Picric acid (苦味酸)	229. 12	1. 76

此外，对物体检查的高通过率是 CT 能应用于安全检查的最基本使用要求，这促使安检 CT 采用最先进的 CT 技术（例如螺旋锥束扫描）；由于安检物品断面尺寸大于人体，且处于连续检查的工作环境，使得安检 CT 的硬件技术在许多环节超过了对医学 CT 的要求，如桶架系统（gantry），射线源（能量和流强的提高、X 光机球管冷却、X 射线束流稳定性等）、滑环系统、数据采集及传输系统等；安检 CT 有密度分辨、自动检查分析、智能识别及示警的特殊要求，检查对象又具有复杂性和多样性，这对算法及软件提出了更高的要求。

5 FAA与EDS

FAA 对爆炸物检测技术及产品的评价已成为国际认可的标准。FAA 认证是为了向美国机场安全提供产品推荐，其对 CT 型 EDS 有一套专门的认证标准，只有符合标准设备的才能在美国国内机场安装。爆炸物检测产品的最重要性能指标就是检查的通过率和误报率，这也是美国 FAA 对该类产品认证的最重要依据。1993 年 9 月，FAA 颁布了对行李检查 EDS 系统认证的标准，标准涉及以下方面：

- 可探测爆炸物种类
- 可探测到的爆炸物量阈值
- 通过率，即每小时检查行李量
- 对爆炸物的探测率
- 容许的最大误报率
- 设备自动报警

X 射线 EDS 技术分两大类：CT 型 EDS 和非 CT 型 EDD。CT 型 EDS 是 FAA 认证的爆炸物检测系统，非 CT 型 EDD 不被 FAA 认证、但授予资质，准予应用的爆炸物检测设备。截止目前，全球通过 FAA 认证的 EDS 产品有三种，均以 CT 为核心探测技术；通过 FAA 许

可使用的 EDD 产品核心技术主要是伪 CT 或真双能等。国际许多公司及科研机构把爆炸物探测技术研究作为今后的一个重大科研方向, 从各种技术角度深入研究。目前为止, CT 技术是国际市场上进行爆炸物探测最成熟、探测性能最好的一种技术。

6 CT 型 EDS 产品一览

1994 年年初, 美国的 Invision 公司的 CTX5000 在 FAA 技术中心接受测试, 并成为第一种通过 FAA 认证的 EDS 产品。该产品是从医用 CT 的原型改造而成的, 其通过率为 120/小时。1998 年, CTX5500 通过认证, 它是 CTX5000 的升级版。



图 4 Invision 公司的 CTX5000

2000 年 1 月, 对 eXaminer 3DX6000 的第二次测试通过, L-3 Com 成为第二家获得 FAA 的 EDS 认证的公司。

如图 5 所示, eXaminer 3DX6000 的总体形式为螺旋锥束、多层 CT, 总尺寸: 2380(W) × 2194(H) × 6451(L), 重量 3050 kg, 通过率 ~500/hr, 误报率宣称 <20%。



图 5 L-3 Com 公司的 eXaminer 3DX6000

此后 L-3Com 公司陆续有新型号产品通过 FAA 测试。2000 年 3 月, 软件改进版的 CTX9000 通过测试; 2000 年同期, CTX2500 (小机场单机版本, 低通过率, 低成本) 通过认证; 2000 年年底, eXaminer 3DX3000 通过认证; 2002 年 6 月, VCT 30 通过认证; 2003 年 8 月, eXaminer 3DX1000 通过认证。

7 CT 型 EDS 面临的挑战与发展

目前世界上的 CT 型 EDS 系统主要安装在各大机场,数量也达到了数千套。受日益增加的航空客流量影响和反恐形势所提出的更高要求,CT 型 EDS 系统的检查通过率面临着严峻的挑战。为了不影响机场的正常运行和旅客的行程安排,必须有足够的安检 CT 以对付客流高峰。然而由于该产品造价高昂,单纯依靠大量的采购是不现实的。为了解决这个矛盾,全新的针对航空安全的全面解决方案应运而生。

7.1 面向航空安全的全面解决方案

在图 6 所示的多层检查系统结构中,每一层都是一种单独的设备。所有的被检行李全部通过第一层 X 射线透视系统,如发现异常则转移到第二层非 CT 型 EDD 系统,再次检查确认后如仍有异常则转入第三层 CT 型 EDS 系统,若无爆炸物则通过,否则人工开箱处理。CT 型 EDS 系统是这种方式中最后的自动检测设备,也是整个检查体系中的核心。由于其他两种设备的成本相对低廉,因此通过采用多种设备相结合的检查方式,可以有效的解决满足通过率和控制成本之间的矛盾。

最新的 CT 型 EDS 系统将普通的 X 射线透视装置与 CT 型扫描装置集成为一体,组成一个具有预扫描功能的爆炸物检测系统。当被检行李通过 X 射线透视装置时,如果发现可疑物,系统自动记录其位置并启动 CT 对该部位进行扫描。采用预扫描方式可以大大提高系统的通过率,因为不再需要对整个行李进行 CT 扫描了。

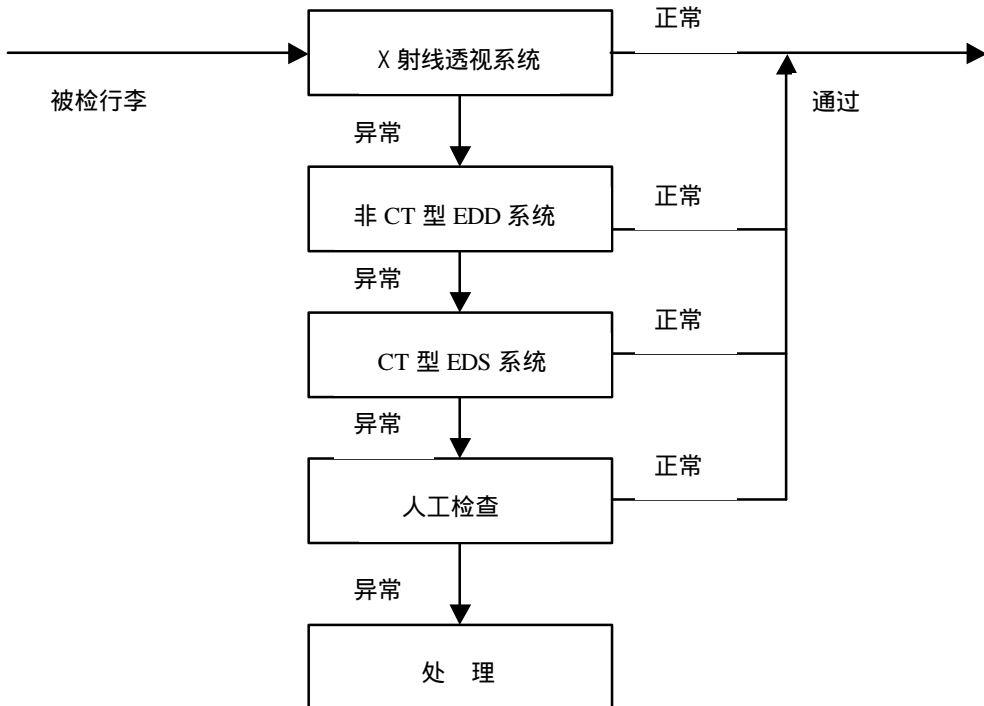


图 6 面向航空安全的全面解决方案

7.2 CT 型 EDS 技术与其它技术的结合

误报率是 CT 型 EDS 系统的另一个被广泛关注的性能指标。因爆炸物种类繁多,其密度也不完全是确定值,因此经常发生误报漏报的情况。据报道,美国目前机场已经部分安装的 CT 型 EDS 系统的误报率高达 20-30%。世界各国的公司和研究机构都在尽力解决这个问题。目前来看,双能 CT 扫描系统是一个很有希望解决误报率的方案,如图 7 所示。在实施方法中,通常采用一高、一低两个不同能量的 X 射线,测试被检测物的光电散射和康普顿散射全吸收截面。看这被检测物的光电散射和康普顿散射全吸收截面的变化规律及它们之间的变化系数差等。用这些测得的数据与数据库中各种爆炸物和毒品的标准样品的数据对比,如果它与某种危险品的数据基本一样,则可确定为此种危险品。将双能技术与 CT 技术结合在一起,就可以同时得到物质的三维密度和原子序数的信息,这将大大的降低系统的误报率。

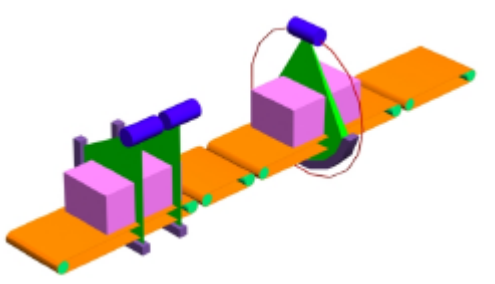


图 7 双能 CTCT 扫描系统示意图

8 结 论

爆炸物是威胁公共安全的重要因素,而 CT 技术已经证明是检测爆炸物的一个有效手段,因此 CT 在爆炸物检测领域有着广泛的市场和良好的应用前景,针对 CT 型 EDS 系统的研究和开发也必将越来越受到世界各国的重视。CT 技术也将不断的发展与创新,以适应日新月异的国际安全检测领域。

国外已有该领域的产品问世并投入运行,但仍有不少问题有待解决。目前国内这方面属于空白,无论从核心硬件还是软件算法及智能识别方法,都面临新的挑战。为了国家和人民生命财产的安全,需要加大投入力度,争取早日开发出爆炸物检测领域的 CT 型 EDS 产品。

参考文献:

- [1] Cormack A M. "Representation of a Function by Its Line Integrals with Some Radiological Applications"[J].Journal of Applied Physics, 1964, Vol.35, No.10,p2908.
- [2] Alschuler M D, Chang T, Chu A. Proc Soc Photo-Opt Instrum Eng[D].1979, p287.
- [3] Dennis M J. Industrial Computed Tomography in Metals Handbooks [D].Vol.17: Nondestructive Evaluation and Quality Control, ASM, Metals Park OH, 1989.
- [4] 孟祥承.“爆炸物及毒品的探测技术”[J].2003,Vol 23, No.4, p371.

作者简介: 吴万龙(1971-),男,获清华大学工程硕士学位,高级工程师,现在清华同方威视科技有限公司从事特异物质检测技术研究和安检产品的开发。