

# 康普顿散射成像技术 发展及应用

刘彦韬<sup>1,2,3,4,\*</sup> 李昕<sup>1,2</sup> 尚嘉宣<sup>1,2</sup> 章志明<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 中国科学院高能物理研究所 北京市射线成像技术与装备工程技术研究中心 100049;

2. 中国科学院大学 核科学与技术学院 100049; 3. 济南中科核技术研究院 250131;

4. 国家原子能机构核技术(核探测与核成像)研发中心 100049)

## 1. 引言

自1895年德国物理学家W. C. Röntgen发现X射线以来,利用X射线的强穿透能力进行透射成像,就作为一项重要的无损检测技术在医学诊断、工业检测、安全检查、科研考古等领域被广泛应用。其中,基于多角度X射线透射图像的计算机断层成像(Computed Tomography, CT)技术更被视为当今综合性能最优的无损检测手段,能够以二维断层或三维立体形式,直观、清晰、准确地复现出物体内部结构、材质和微小缺陷等,空间分辨可达微米甚至纳米量级。然而在透射成像时必须将射线源和探测器分置于被测物体两端,X射线必须完全穿透整个物体才能成像,因此在一些特殊应用场景例如地下埋藏物搜寻、墙体隐藏物探测、大型厚重物体的亚表面缺陷检测等,经常存在设备放不下、射线穿不透、目标检不出等问题,难以开展原位检测。

那么对于这些透射成像无能为力的特殊场景该如何检测呢?事实上,X射线在穿透物体的同时也会被物体所散射,我们也可以通过探测被物体散射回来的X射线来重建物体内部结构,这种方式被称为康普顿散射成像(Compton Scatter Imaging, CSI)。康普顿散射在全空间任意方向上均能发生,

其中散射角 $\theta < 90^\circ$ 的通常称为前向散射,而 $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ 的称为背(向)散射。由于实践中更多是选择将射线源和探测器置于被测物体(如地面、墙体、大型厚重物体等)同侧,利用背散射射线进行成像,因此CSI也常被称为X射线背散射成像(X-ray Backscatter Imaging, XBI)。由于入射射线和散射射线存在一定夹角,如果能同时定位入射射线与散射射线方向(忽略多次散射的影响),即可直接判断出康普顿散射实际发生位置,实现三维成像即康普顿散射断层成像(Compton Scatter Tomography, CST),而无需像CT技术那样依赖多角度透射图像采集和复杂算法重建来实现,因此便于在用户现场进行原位、实时、三维无损检测。在图像特点上,透射图像和散射图像也有很大区别,如图1所示,透射图像通常具有较高的空间分辨,对平均原子序数较大,密度较高的材料如铜、铁等重金属较为敏感,对平均原子序数较低,密度中等的材料如塑料等有机物不太敏感,因此对复杂金属背景下夹藏着的毒品、炸药等有机违禁品很难检测出来;散射图像的空间分辨一般,但对于塑料等有机物较为敏感,图像呈高亮状态且明暗程度与材料密度正相关,而对于重金属,由于自身对X射线衰减严重,图像呈灰暗状态,因此能在复杂背景中凸显出有机违禁品,受到安防部门高度重视。



图1 典型透射图像与散射图像对比(安检应用)

基于对探测布局灵活,对低原子序数材料灵敏,支持原位实时三维成像等独特优势,CSI(含CST)设备在许多领域也有重要应用,但受其成像原理机制影响,也普遍存在射线利用率低、空间分辨一般、图像信噪比差等问题,制约了该技术发展及应用。这主要由于散射射线方向杂乱,在特定方向上的散射探测器所能接收的信号量不足同等规格透射探测器的1%,大多数成像系统依赖针孔或平行孔准直器等进行射线定位,进一步限制散射射线利用率等。本文试图通过通俗语言使读者们了解CSI(含CST)基本原理和技术特点,然后穿插一些典型案例介绍不同CSI(含CST)成像机制及其在医学诊断、工业检测、安全检查、科研考古等领域的应用情况。

## 2. 康普顿散射成像基本原理

典型的CSI探测几何如图2所示,一束经适当准直的X/γ射线入射被测物体并在体素  $dV$  处发生散射,散射射线经准直后被在散射角  $\theta$  方向上的探

测器所接收。假定体素  $dV$  内的电子密度为  $\rho_e$ , 原子序数为  $Z$ , 密度为  $\rho$ , 入射光子流强为  $\Phi$ , 入射光子能量为  $E_0$ , 散射光子能量为  $E_s$ , 在散射角  $\theta$  方向上的微分散射截面为  $d\sigma_{KN}(\theta)/d\Omega$ , 电子静止质量为  $m=511 \text{ keV}$ , 电子经典半径为  $r_0=2.82 \text{ fm}$ , 光速为  $c=3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

$$E_s = \frac{E_0 mc^2}{mc^2 + E_0(1 - \cos \theta)} < \frac{mc^2}{1 - \cos \theta} \quad (1)$$

$$\frac{d\sigma_{KN}(\theta)}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \left( \frac{E_s}{E_0} \right)^2 \left( \frac{E_s}{E_0} + \frac{E_0}{E_s} - \sin^2 \theta \right) \quad (2)$$

对于自由静止电子,根据能动量守恒原理可知

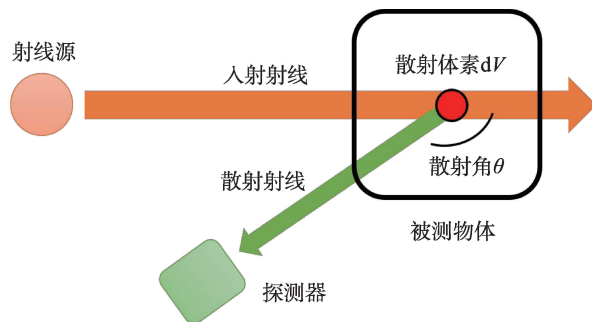


图2 康普顿散射成像的探测几何示意图

$E_s$ 仅与 $E_0$ 和 $\theta$ 有关,如(1)式所示,与物质材料无关。当 $\theta$ 固定时,无论 $E_0$ 多大, $E_s$ 存在一个理论上限。散射射线的角分布如(2)式和图3所示,当 $E_0$ 较小时,前向散射和背散射事例发生几率大体相当,随着 $E_0$

增大,背散射事例发生几率会显著减少。因此从能量上限和角分布两方面来看,在CSI应用中,当确保X/γ射线能够到达样品检测所需深度时,入射X/γ射线能量选取均不宜过高。

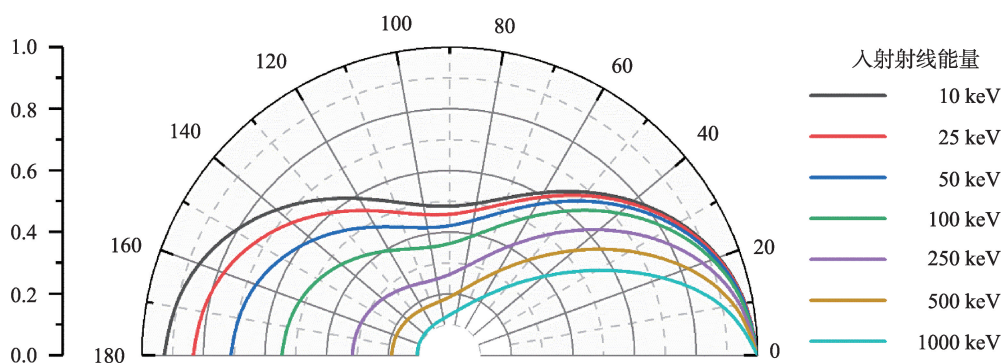


图3 不同入射射线能量下的散射射线角分布变化图

对于低 $Z$ 材料,忽略多次散射影响,在散射角 $\theta$ 方向上的散射射线强度(计数率) $dN$ 可近似表达为(3)式,

$$dN = \Phi f_0 f_s \rho_e \frac{d\sigma_{KN}}{d\Omega} dV \quad (3)$$

这表明在扣除入射路径和散射路径上造成的X/γ射线总衰减量影响后,散射射线强度与对应体素内的电子密度成正比。由于低 $Z$ 材料(除氢元素外)密度与电子密度基本成比例,因此宏观上散射射线强度能够大致反映出该处材料密度分布,这就是CSI的物理基础。

### 3. 康普顿散射成像典型机制及相关应用

#### 3.1 逐点扫描散射成像

CSI概念源于1959年英国医学物理学家P. G. Lale试图通过分析散射信号来分辨人体软组织的细微差异<sup>[1]</sup>。由于当时CT技术尚未发明,在常规X光片中,软组织微小病变很容易被透射路径上的骨骼或其他软组织所掩盖,因此利用CSI能够直接三维定位的特点来观察软组织密度变化是很好的想法。但受当时探测技术水平限制,早期CSI(含CST)

设备只能采用逐点扫描方式,即将大活度放射源(如 $^{60}\text{Co}$ 等)发出的高能γ射线准直成笔束入射物体,然后使用带准直的单点探测器来收集散射射线(图1),最后配合外置二维平移机构实现逐像素成像。在医学诊断需求驱动下,逐点扫描CSI技术不断优化,直到1981年由加拿大的J. J. Battista等人研制出国际上首套实际用于临床研究的逐点扫描CST系统<sup>[2]</sup>,其空间分辨约5 mm,相对密度分辨约±4%,整体性能已接近当时理论估计水平。然而遗憾的是,由于同期CT技术问世并快速发展,无论在空间分辨还是密度分辨方面,逐点扫描CST系统相较于CT系统均有差距,因此医学界普遍认为CST系统潜力有限,不再深入研究。近年CSI技术在医学诊断方面重获关注,尤其是作为肿瘤立体定向放疗过程中的图像引导手段<sup>[3]</sup>,无需使用额外辐射源,可明显减少患者受照剂量,此处限于篇幅不再展开。

墙内开花墙外香,尽管在医学诊断领域受挫,但凭借对物体密度敏感,能够单侧成像的优势,逐点扫描CSI技术很快在工业检测领域崭露头角,尤其是作为一种高灵敏密度探针用于地表、墙面、石材、金属等大块均质材料缺陷检测,能够规避常规透射成像设备无法布局的问题。我国由于历史发展原因,相关研究起步较晚,直到1995年才由丁厚本

等人研制出国内首套基于<sup>137</sup>Cs放射源的逐点扫描CST设备LBD101,并实际用于飞机刹车片、涡轮机叶片、固体火箭发动机部件等无损检测<sup>[4]</sup>,检测视野约20 cm × 20 cm × 10 cm,检测效率约20 cm<sup>2</sup>/min,空间分辨约0.8 mm,密度灵敏度约1%,填补了当时国内技术空白。然而此类逐点扫描CSI(含CST)设备检测效率极低,加之高能γ射线源需要严格防护,使用较为不便,目前很难适应快速检测需求,被逐渐淘汰。

### 3.2 飞点扫描散射成像

随着X球管技术发展和对CSI理论认识加深,20世纪70年代研究人员逐渐使用X球管产生的中低能X射线替代大活度放射源进行CSI研究。1981年美国学者B. C. Towe和A. M. Jacobs共同提出一种基于飞焦点式X球管的全新机制<sup>[5-6]</sup>,在保持射线源和探测器不动情况下,通过快速调整X球管电子束焦斑位置配合针孔准直器来获得不同朝向的笔束X射线对被测物体往复扫描,此时被测物体只需一维移动即可实现逐像素快速成像,显著提高整体成像速度。这一突破性进展很快掀起飞点扫描CSI技术研究热潮,众多学者纷纷效仿并创新发展了多种使用常规固定焦点X球管配合不同结构的旋转

准直装置如转筒准直器、切轮准直器、狭缝斩波盘等来获取朝向快速变化的笔束的飞点扫描方案,直到今天仍是CSI主流成像机制之一。作为当时飞点扫描CSI技术的领头羊,德国Philips研究实验室(现为YXLON公司)发展的ComScan飞点扫描CST系统颇具代表性<sup>[7]</sup>,如图4所示,其采用两个开有螺旋形狭缝高速旋转的同轴圆柱体构成转筒准直器以快速获得朝向连续变化的飞点笔束,在笔束扫描面两侧各配置一组锗酸铋闪烁体阵列探测器和针孔准直器用于获取笔束入射路径上不同深度的散射体素信息,检测效率约40 cm<sup>2</sup>/min,空间分辨约1 mm,最大检测深度约50 mm,最小检测层厚约0.4 mm,在工业探伤、地雷探测、壁画研究等方面均有广泛应用。

由于CSI技术在有机物探测方面具有独特优势,近年在安全检查领域也逐渐受到各国边防、特警、禁毒、保密等相关部门重视。尤其是美国AS&E公司基于切轮准直器发展的系列化飞点扫描CSI设备,包括Gemini包裹检查系统、SmartCheck人体检查系统、Z Portal车辆/集装箱检查系统、ZBV移动式安检车、MINI Z手持式安检仪等,凭借优秀的有机物对比度和良好的空间分辨,在打击走私、禁毒查危、反窃密等方面发挥了重要作用。目前国内也有

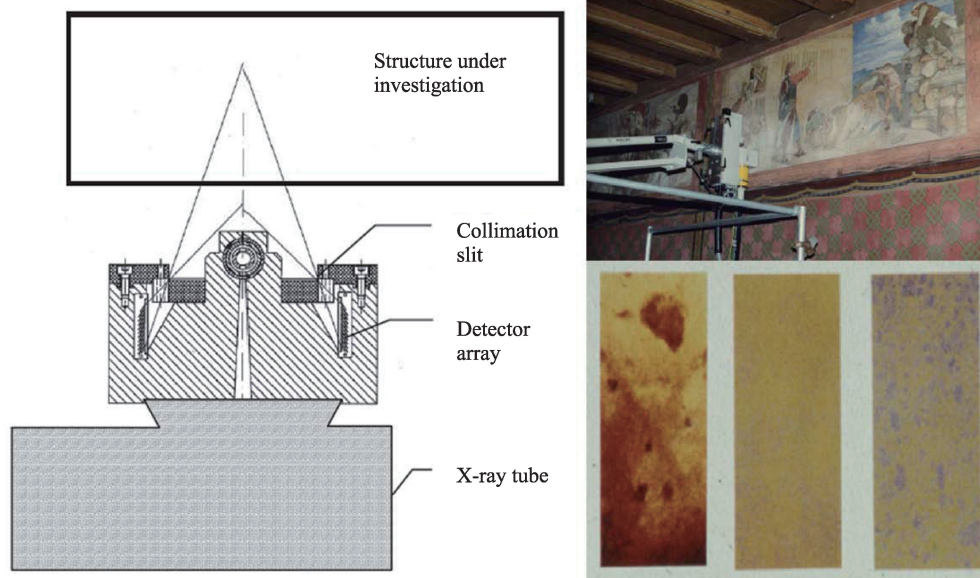


图4 德国的飞点扫描散射断层成像系统(ComScan)原理图及壁画研究应用示例<sup>[7]</sup>

多家科研机构在布局开展针对安检需求的飞点扫描 CSI 技术研究和系统研制并取得一定成果。

总体而言,经过多年技术发展飞点扫描 CSI 技术相对成熟,但其本质仍是逐点扫描方式,对射线源利用率很低,只是巧妙通过时间复用来区分不同散射体素,再根据理论计算的时间序列来进行散射体素定位。因此对于飞点笔束的产生机构(如飞焦点 X 球管或旋转准直装置)的速度、精度和稳定性要求很高,一旦出现定位错误很难在后期进行数据校正。此外飞点笔束顺次扫过各个体素,如果体素分割较细则笔束在单个体素上停留时间很短,信噪比很低,反之则会显著影响空间分辨,两者此消彼长,难以兼顾。这些因素决定了飞点扫描 CSI 只能通过增大探测器面积等来提高射线利用率,未来成像效率很难再有飞跃性突破。

### 3.3 直接推扫散射成像

想要提高射线利用率,一种自然想法就是直接利用扇束 X 射线结合大面积探测器进行成像。但由于散射射线缺乏方向性,因此直接推扫 CSI(含 CST)系统需要使用特定结构的后准直器对全部散

射体素同时定位,并配备更为复杂的阵列探测器和多通道采集电子学进行散射射线探测。这种技术直到本世纪随着阵列探测器和多通道采集电子学技术普及才受到各国重视,相比于飞点扫描 CSI,直接使用扇束 X 射线的推扫 CSI 对射线源利用率大幅提升,扇束在各个体素停留时间不因体素分割大小而改变,配合高分辨阵列探测器可同时实现高空间分辨和高信噪比。由于无需使用高速旋转驱动机构才产生飞点笔束,整体系统稳定性和可靠性明显改善,即使一维平移机构出现故障造成图像拉伸也容易出现异常并及时校正。例如 2016 年美国物理光学公司在国家航空航天局资助下针对大型航天航空部件亚表面缺陷无损检测,开展了基于扇束 X 射线、针孔准直器和面阵列探测器的推扫 CST 技术研究和系统研制<sup>[8]</sup>,如图 5 所示,整套设备重量仅约 40 kg,可自由搭载在机械臂上,检测视野约 30 cm × 20 cm × 15 cm,检测效率超过 100 cm<sup>2</sup>/min,空间分辨约 1~2 mm,密度灵敏度优于 2%,并能检出厚度小于 0.1 mm 的界面脱粘等微小缺陷等,能够清晰显示某运输机起落架舱门的三维轮廓结构和内部腐蚀情况等。

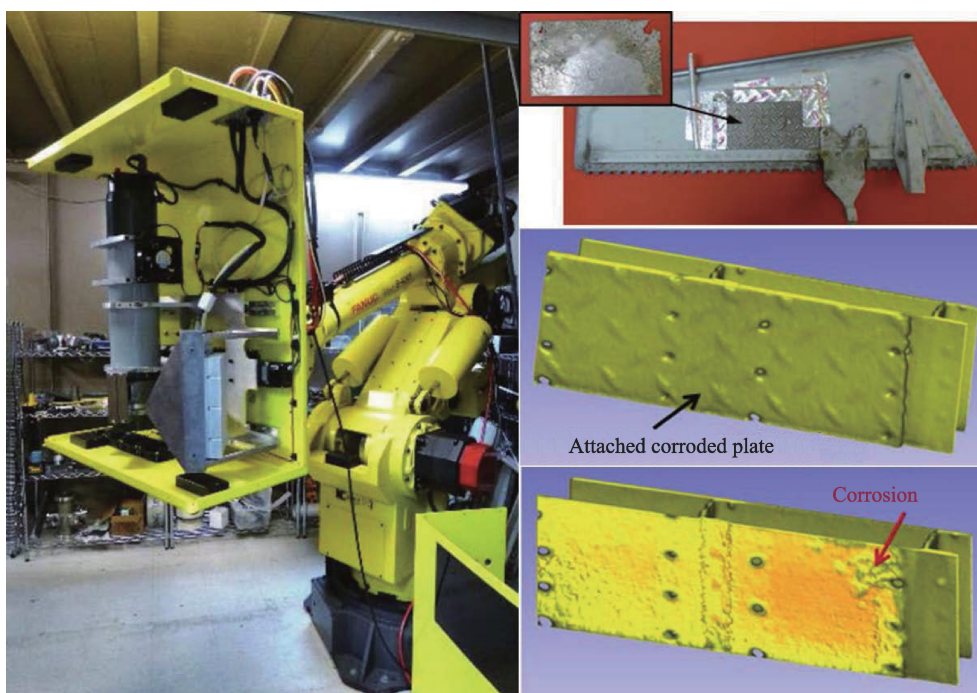


图 5 美国物理光学公司的直接推扫散射断层成像系统与三维无损检测应用示例<sup>[8]</sup>

本团队在直接推扫 CSI(含 CST)技术研究和系统研制方面也开展了大量工作,例如2008年孙光智等人基于硅酸钇镨闪烁体和位置灵敏光电倍增管研制了直接推扫 CSI 原理样机实现功能验证<sup>[9]</sup>;2013年刘彦韬等人基于硅酸钇镨闪烁体和非位置灵敏光电倍增管研制了具有一定深度甄别能力的双排推扫 CSI 系统<sup>[10]</sup>,既保留了线阵列探测器在探测灵敏度上的优势又能根据两排探测器对应像素信号差异来判断地下埋藏物深度信息;2019年肖雄等人基于硅酸钇闪烁体阵列和新型硅光电倍增管研制了紧凑型线阵列探测器和移动式推扫 CSI 系统<sup>[11]</sup>,针对工具箱、轮胎、铁管等进行成像均得到较好效果,空间分辨约 4 mm,后续还集成在通道式安检机中实现了透射/散射联合成像(图 1)。近期本团队也开发了一种能够实现单侧、原位、实时、三维成像的直接推扫 CST 原理样机,如图 6 所示,X 光机发出的锥束 X 射线被前准直器(狭缝)准直成 2 mm 宽的扇束后斜入射被测样品,与样品发生康普顿散射,散射射线经过后准直器(针孔)被面阵探测器收集,面阵探测器像素数为 21×21,单像素尺寸为 2.1 mm×2.1 mm,每次成像可获得一帧样品二维截面图像,通过载物平台步进平移即可获得多帧二维截面图像,最终堆叠形成物体三维结构,能够清晰重建出样品三维轮廓和内部空腔等细节,最佳空间分辨约为 1.5 mm。

### 3.4 编码孔径散射成像

直接推扫 CSI 技术显著提升了射线源利用率,然而由于探测器端需要采用针孔或平行孔准直器等进行散射射线定位,浪费了大量散射射线事例,因此整体成像效率与飞点扫描 CSI 仍在同一量级上,那么是否有办法进一步提升散射射线利用率呢?为了突破针孔或平行孔准直器对于散射射线利用率的限制,2003 年加拿大 A. A. Faust 等人借鉴 X 射线天文学和核安全监测领域常用的编码孔径技术提出了编码孔径 CSI 的概念并于 2009 年研制出手持式编码孔径 CSI 原理样机完成仿真地雷成像实验<sup>[12]</sup>,空间分辨约 6 mm,能量分辨约 8% @ 60 keV。编码孔径技术简单理解就像是小孔成像的加强版,如图 7 所示,首先利用特殊图样的编码孔径阵列进行信号调制,形成多个相互叠加的倒立投影图像,再利用相应解码算法对编码图像进行滤波重建,重新获得高信噪比、高分辨率的解码图像,可以提升散射射线利用率 1~2 个量级。

2014 年,本团队在直接推扫 CSI 技术基础上也进一步结合编码孔径技术,创新提出了编码孔径推扫 CSI 的新机制并获得中国发明专利授权(ZL201410225310.3),简单来说就是采用一维编码板替代平行孔准直器,通过散射体素与探测器像素的一多对应来大幅提高散射射线利用率。2019 年刘彦韬等人进一步研制了编码孔径推扫 CSI 原理样

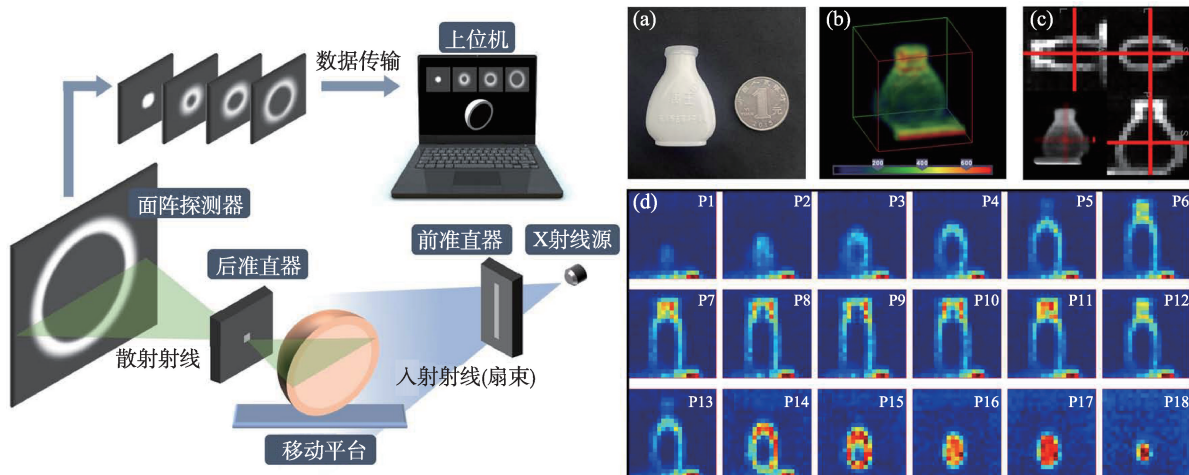


图 6 本团队开发的直接推扫散射断层成像系统及成像效果示例

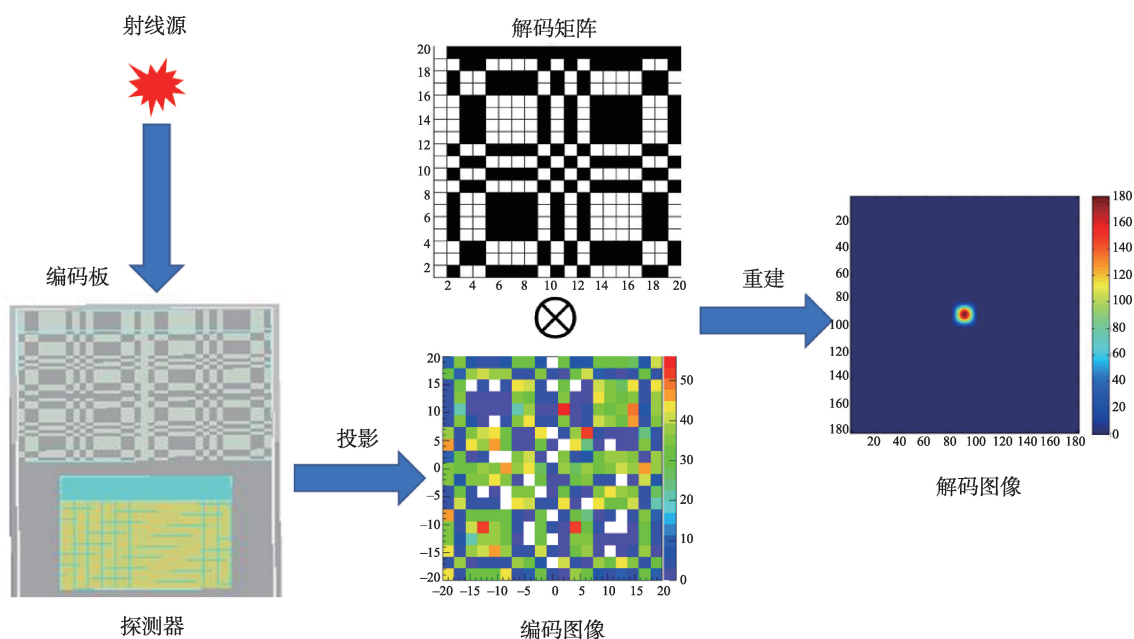


图7 编码孔径成像原理

机<sup>[13-14]</sup>,如图8所示,结果表明该技术相较直接推扫CSI无论在探测效率还是在空间分辨方面均有较大提升,但也发现在近距离成像条件下对于复杂物体而言,编码孔径技术的引入会带来不容忽视的图像伪影需要校正,通过采用正反编码板叠加重建和极大似然期望最大化迭代重建等算法能够在一定程度上改善了近场伪影但还需要持续优化。由于目

前该技术尚未成熟,国内外尚没有编码孔径推扫CST系统问世,但可以预见如果使用二维编码板替代针孔或平行孔准直器并解决编码孔径技术在近距离成像中带来的复杂伪影问题,将显著提升散射射线利用率,改变目前CSI技术受其成像机制限制图像信噪比差的弊端。而且由于编码孔径技术兼具小孔成像那样在保持角分辨不变情况下通过成

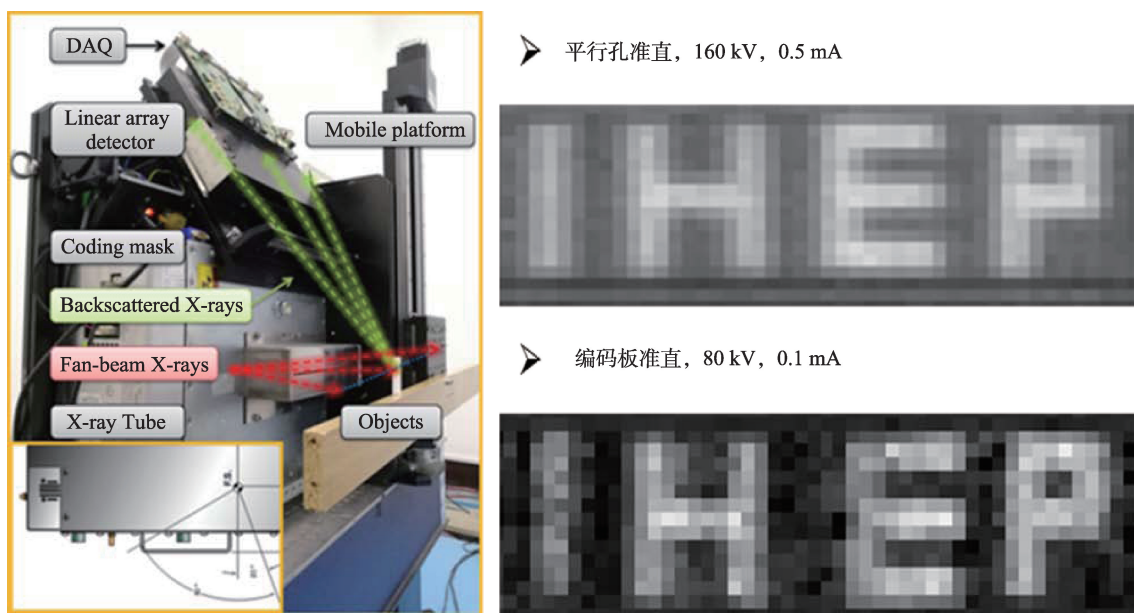


图8 本团队开发的编码孔径推扫散射成像系统及成像效果示例

像距离变化改变空间分辨的特性,可以在不改变X球管和面阵列探测器布局的情况下,仅通过替换编码板和改变成像距离兼容大视场低分辨成像(粗扫)和小视场高分辨成像(精扫),因此极具发展潜力。

### 3.5 龙虾眼聚焦散射成像

除了通过编码孔径技术可以提升射线利用率外,国际上还流行通过一些特殊光学元件直接对X射线聚焦的方式,其中最为典型的当属龙虾眼聚焦结构。龙虾的眼睛是由成千上万个矩形细胞构成,长度大约为宽度两倍,可将一定角度内的可见光反射聚焦形成明亮图像,使其在昏暗的环境下也能快速定位猎物。1975年德国天文学家W. K. H. Schmidt率先模拟龙虾眼睛提出一种由两排平面反射镜阵列按正交结构叠加而成的X射线聚焦结构<sup>[15]</sup>,而后美国学者J. R. P. Angel又提出一种由排列于球面上的多个矩形单元构成,更加接近真实龙虾眼的聚焦结构<sup>[16]</sup>,具有结构紧凑、灵敏度高、信噪比高等优点。但由于X射线的强穿透力,这些结构仅能对10 keV以下的软X射线实现聚焦,无法在硬X射线成像领域应用。本世纪初美国物理光学公司开发了一种长条空心金属微通道板并成功实现对60 keV作用的硬X射线聚焦并提出龙虾眼聚焦CSI概念<sup>[17]</sup>,直接使用锥束X射线照射被测物体,再利用金属微通道板将背散射光子汇聚到闪烁屏上,实现无需扫描的凝视成像。他们在美国国土安全部资助下还成功研制一款手持式龙虾眼X射线成像仪LEXID并实际用于安全检查等,取得良好效果(图9)。

### 3.6 能量解析散射成像

上述提到的各种CSI成像机制主要是利用X射线时间和空间信息进行成像,却很少利用到康普顿散射效应中特有的散射能量与散射角的依赖关系。事实上早在1971年英国学者F. T. Farmer和M. P. Collins就提出了在逐点扫描CSI基础上采用广角准直的高能量分辨探测器来收集散射光子,再根据散射能量依赖关系能够同时分辨笔束入射路径上多个散射体素信息的想法<sup>[18]</sup>。1978年美国学者N. N. Kondic进一步将射线源和探测器都采用广角准直方式,并根据能量依赖关系推导出如果忽略多次散射和衰减影响则所有相同能量的散射光子均源于同一段圆弧——等偏角线上,因此散射信号可认为是物体电子密度在等偏角线上的积分<sup>[19]</sup>。在此基础上,1994年美国学者S. J. Norton提出了首个基于Radon变换(类似于现代CT技术)的能量解析CST方案<sup>[20]</sup>,在采集过程中单能 $\gamma$ 射线源固定不动,通过探测器水平移动形成的系列等偏角线来实现对物体不同位置多角度扫描,并发展了一套圆弧滤波反投影算法用于反解电子密度,近年来也得到很多CT算法专家重视和效仿。由于能量解析CSI技术对射线源类型和探测器能量分辨率都有苛刻要求,目前国内外研究团队基本均停留在理论算法创新和模拟数据论证上,尚未有实用化的成像系统问世。这是因为目前主流采用的X球管产生的X射线能量是连续的,无法判断入射能量,再则即使采用单能 $\gamma$ 射线源入射,所需的探测器能量分辨要



图9 美国物理光学公司的龙虾眼聚焦散射成像系统及成像效果示例



求也很高,只能依赖半导体探测器才能实现,此外目前算法基本都忽略了多次散射和衰减影响,一旦加入这些因素后,图像质量将迅速变差。未来随着高能量分辨的室温半导体技术发展,能量解析 CST 技术能否实现革命性突破还需拭目以待。

#### 4. 总结与展望

CSI 技术探测布局灵活,对低原子序数材料灵敏,支持原位实时三维成像,在诸多领域均有重要应用。本文简要介绍各种 CSI 成像机制原理和当前面临的主要技术瓶颈限制。目前飞点扫描 CSI 和直接推扫 CSI 是两条主要技术路线,也有很多成功案例可以借鉴,但着眼未来发展,编码孔径推扫 CSI 如果在 X 射线源结构、编码方式选择和图像重建算法等方面有所突破的话,有望成为下一代高性能成像系统的优选方案。

#### 参考文献

- [1] LALE P G. The examination of internal tissues, using gamma-ray scatter with a possible extension to megavoltage radiography[J]. *Physics in Medicine & Biology*, 1959, 4(2): 159-167.
- [2] BATTISTA J J, BRONSKILL M J. Compton scatter imaging of transverse sections: an overall appraisal and evaluation for radiotherapy planning[J]. *Physics in Medicine & Biology*, 1981, 26(1): 81-99.
- [3] REDLER G, JONES K C, TEMPLETON A, et al. Compton scatter imaging: A promising modality for image guidance in lung stereotactic body radiation therapy[J]. *Medical Physics*. 2018, 5(3):1233-1240.
- [4] 丁厚本, 李虹. 一种便携式高分辨率康普顿背散射扫描仪[J]. *CT 理论与应用研究*, 1996, 5(3): 37-44.  
DING Houben, LI Hong. A portable high resolution Compton backscatter scanning instrument[J]. *CT Theory and Applications*, 1996, 5(3): 37-44 (in Chinese).
- [5] TOWE B C, JACOBS A M. X-Ray backscatter imaging[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1981, 28(9): 646-654.
- [6] TOWE B C, JACOBS A M. X-ray Compton scatter imaging using a high speed flying spot X-ray tube[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1981, 28(10): 717-721.
- [7] HARDING G, HARDING E. Compton scatter imaging: A tool for historical exploration[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2010, 68: 993-1005.
- [8] ROMANOV V, GRUBSKY V, ZAHIRI F. Compton imaging tomography for nondestructive evaluation of large multilayer aircraft components and structures[C]// *AIP Conference Proceedings* 1806. New York: AIP Publishing, 2017: 130001.
- [9] SUN Guangzhi, CHEN Ximeng, WEI Long, et al. Development of a type of a one-dimensional position-sensitive scintillator - fiber detector for X-ray backscatter imaging[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2008, 594(1): 61-65.
- [10] LIU Yantao, ZHANG Zhiming, LI Daowu, et al. Depth discrimination method based on a multirow linear array detector for push-broom Compton scatter imaging[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2013, 82: 293-299.
- [11] XIAO Xiong, LIU Yantao, CAO Daquan, et al. A compact, high signal-to-noise ratio line-detector array Compton scatter imaging system based on silicon photomultipliers[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2019, 154: 108845.
- [12] FAUST A A, ROTHSCHILD R E, LEBLANC P, et al. Development of a coded aperture X-ray backscatter imager for explosive device detection[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2009, 56(1):299-307.
- [13] LIU Yantao, XIAO Xiong, ZHANG Zhiming, et al. A novel method of coded-aperture push-broom Compton scatter imaging: Principles, simulations and experiments[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 940: 30-39.
- [14] LIU Yantao, XIAO Xiong, ZHANG Zhiming, et al. Near-field artifacts reduction in coded aperture push-broom Compton scatter imaging[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2020, 957: 163385.
- [15] SCHMIDT W K H. A proposed X-ray focusing device with wide field of view for use in X-ray astronomy[J]. *Nuclear Instruments & Methods*, 1975, 127(2): 285-292.
- [16] ANGEL J R P. Lobster eyes as X-ray telescopes[J]. *Astrophysical Journal*, 1979, 233:363-373.
- [17] GRUBSKY V, GERTSENSHTEYN M, JANNSON T, et al. Non-scanning X-ray backscattering inspection systems based on x-ray focusing[C]// *Proceedings of SPIE* 6540. Bellingham: SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2007: 65401N.
- [18] FARMER F T, COLLINS M P. A new approach to the determination of anatomical cross-sections of the body by Compton Scatter of gamma-rays[J]. *Physics in Medicine & Biology*, 1971, 16(4): 577-586.
- [19] KONDIC N N. Density field determination by an external stationary radiation source using a kernel technique[G]// *STOCK D E. Measurements in Polyphase Flows (papers of the ASME Winter Annual Meeting)*, New York: The American Society of Mechanical Engineers (ASME), 1978: 37-51.
- [20] NORTON S J. Compton Scatter tomography[J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 76: 2007-2015.