

从双能CT到光子计数CT:能谱CT技术简介

李伟光^{1,2} 叶 萍^{1,2} 李凯文² 耿立升¹

(1. 北京航空航天大学 100080; 2. 国科离子医疗科技有限公司 100080)

计算机断层成像(Computed Tomography, CT)自20世纪70年代问世以来,凭借其快速、直观、可靠的成像特点,在医学诊断和科研领域得到了广泛应用^[1]。然而,传统的单能量CT存在一些不可避免的局限性。它主要依赖X射线在单一能量条件下的衰减信息进行成像,这会导致组织对比度不足、伪影干扰明显以及难以精确区分不同材料等问题^[2]。尤其在临床中,对于软组织病变的识别、血管成像中的钙化干扰,以及放射治疗中精确剂量学参数的获取,传统CT往往难以满足日益增长的需求。为解决这些问题,能谱CT(Spectral CT)应运而生。它通过利用X射线与物质相互作用的能量依赖性,获取更为丰富和精确的影像信息,不仅为临床影像诊断提供了更广阔的可能性,也为精准医疗的新兴方向注入了新的活力^[3]。

一、能谱CT的基本原理

传统CT的基本原理是利用X射线穿过人体时的衰减差异来形成图像。不同组织(如骨骼、肌肉、脂肪)对X射线的吸收程度不同,计算机将这些差异转化为灰度值,从而重建出体内结构的横断面图像。然而,传统CT存在一个天然的缺陷:它获得的是混合材料下的X射线总衰减。这意味着不同组成成分的组织在图像上可能呈现相似的灰度值,从而难以区分。换句话说,传统CT只能告诉我们组织材料的密度不同,但很难进一步揭示人体组织具体由什么材料组成。正因如此,医生在解读CT时,有时需要依赖额外的造影剂或其他影像学模态检查来辅助判断。

与传统CT不同的是,能谱CT能在其基础上进一步识别组织成分和病变特征。能谱CT的核心思想在于利用物质在不同能量X射线中的衰减系数差异,利用多能量增加的维度信息,区分单能扫描无法区分的材料^[3]。从这个意义上来说,传统CT可以比喻为一台“黑白相机”,它只能记录X射线穿过人体后的总体衰减强度,因此主要反映不同组织之间的密度差异。而能谱CT则类似于“彩色相机”,不仅能够记录图像的“亮度”,还能区分不同能量X射线对应的“颜色”信息。由于不同组织和材料对不同能量X射线的吸收规律并不相同,能谱CT能够利用这些额外的能量维度信息,实现对材料成分的识别与定量分析。

为了获取这些不同能量下的衰减信息,早期能谱CT主要采用双能CT(Dual-Energy CT, DECT)技术。DECT也是目前最成熟、应用最广泛的能谱CT实现形式,其核心思想是利用高、低两种不同能量的X射线(常见的如(80kVp, 140kVp))分别进行成像,并通过比较不同能量下的衰减差异实现材料分析^[4]。根据硬件结构的不同,DECT具有多种实现方式。如双源CT(Dual-source CT)利用两套球管和探测器同时采集不同能量下的数据;快速电压切换CT(Rapid kVp Switching)通过在单一球管上高速切换高低电压来获取双能图像;而双层探测器CT(Dual-layer Detector CT)则依靠能够同时接收高、低能光子的特殊叠层探测器实现分能。图1展示了常见的三种DECT成像模式。

二、技术进展

近年来,随着半导体探测器技术的发展,光子

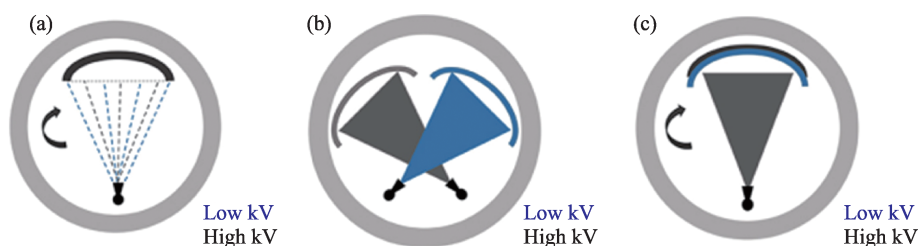


图1 三种不同形式的双能CT扫描成像
(a)快速能量切换;(b)双源扫描;(c)多层探测器^[4]

计数能谱CT(Photon-Counting Spectral CT)逐渐进入研究与临床视野,它能够直接记录入射光子的能量分布,大幅度提升能谱分辨率与空间分辨率,并且降低剂量,被认为是下一代能谱CT的核心发展方向^[5]。与传统CT使用的能量积分型探测器不同,光子计数探测器能够对入射的每个X射线光子进行单独探测,并记录其能量信息。图2展示了两类探测器的差异。与双能能谱CT只能大致区分“高能”和“低能”两种能量的X射线不同,光子计数CT更像“精明的侦探”,能够对每一个入射的X射线光子单独计数,并测量它的能量。它的核心探测器通常由半导体材料制成,当X射线光子打到探测器上时,会产生电子信号,这个信号的大小与光子的能量成正比。电子系统会记录每个光子的能量,并将光子按能量分组,从而获得多组能量信息。

这种方式带来了几个显著优势:首先,更精确的X射线分析能大幅提高成像的空间分辨率,使图像更加清晰;其次,光子计数CT可以减少噪声,提高组织对比度,让医生更容易区分不同组织;最后,通过能量分组,它能同时提供多种材料信息,比如区分钙、碘或软组织的成分,这在传统CT中是难以实现的^[7]。

在软件开发领域,虚拟单能图像及其材料分解算法已得到广泛应用。基于能谱CT数据生成的虚拟单能图像,能够模拟任意能量下的CT成像,不仅能有效提升图像对比度,还可显著抑制金属伪影,从而为临床诊断提供更清晰、更可靠的图像依据。材料分解算法的推进则进一步突破了传统CT仅提供单一CT值的局限,它可以实现碘、水、钙等物质的分离与定量,能够计算电子密度和有效原子序

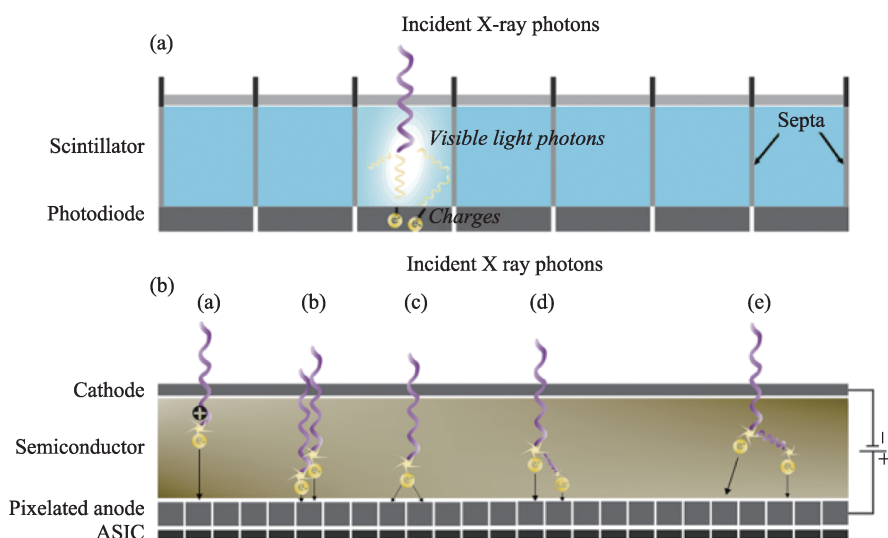


图2 能量积分探测器
(a)和光子计数探测器;(b)差异的示意图^[6]



图3 光子计数CT设备图

数,为疾病诊断和放射治疗剂量计算提供更加可靠的数据。与此同时,人工智能与机器学习的引入(图4),使得能谱CT数据的分析效率和准确性显著提高,在降噪、伪影校正以及特征提取等方面展现出巨大潜力^[8]。

三、国内外硬件发展情况

在全球医学影像设备的发展脉络中,能谱CT的硬件演进始终伴随着厂商间的技术路线竞争与临床需求推动。不同公司根据自身的探测器、球管与重建算法优势,逐渐形成了差异化的实现方式。

目前,较成熟的双能能谱CT系统主要包括以下几类^[10]: Philips的IQon/Spectral CT系列采用双层探测器结构,通过上下两层探测器分别接收高、低能X射线。Siemens Healthineers则以双源双能CT(SOMATOM系列)为代表,通过两套球管和探测器同时采集不同能量的数据,从而获得双能信息。GE HealthCare的Gemstone Spectral Imaging(GSI)系列则主要采用快速电压切换技术,通过球管在高低电压之间高速切换实现双能成像。这些系统涵盖了当前双能CT的主要实现方式,也构成了早期

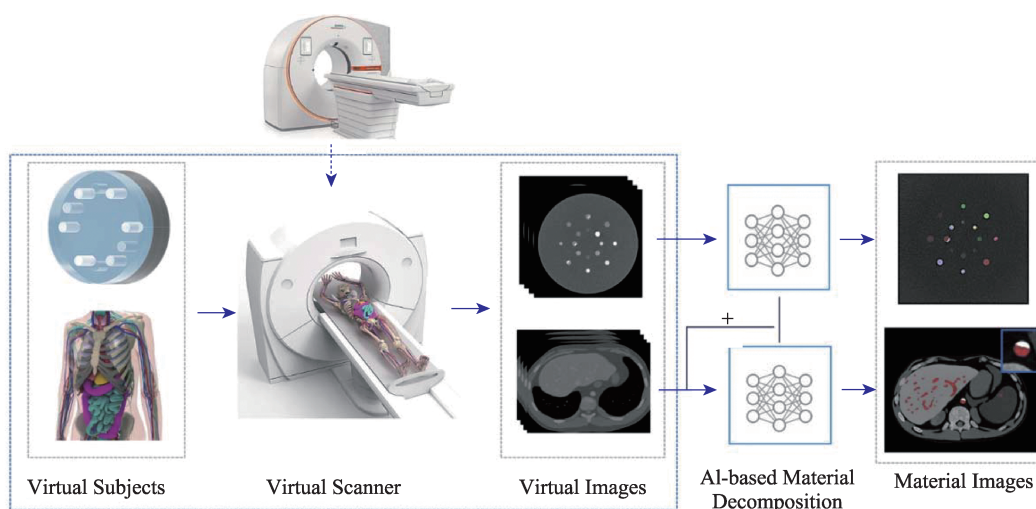
能谱CT的核心技术基础。

如第二节所述,近年来,随着半导体探测器技术的发展,光子计数CT逐渐成为能谱CT的重要发展方向。目前,国际上逐渐形成了以CdTe、深硅(Deep Silicon)和CZT为代表的多种探测器技术路线。

Siemens Healthineers是目前较早实现光子计数CT临床应用的厂商,其Naeotom Alpha系列采用基于碲化镉(CdTe)材料的QuantaMax探测器。CdTe具有较高的原子序数和较强的X射线吸收能力,因此能够在较小探测器尺寸下实现较高的探测效率和空间分辨率。

与CdTe路线不同,GE HealthCare近年来提出了基于深硅(Deep Silicon)探测器的光子计数CT方案。其代表系统Photonova Spectra采用硅作为半导体探测材料,并通过侧向入射结构增加X射线在硅中的有效吸收路径,从而弥补传统硅材料对高能X射线吸收效率低的问题。GE表示,该设计有助于改善能量分离能力,并降低高计数率条件下的信号过载问题^[11]。

此外,日本Canon Medical近期推出的Ultimion光子计数CT则采用碲锌镉(Cadmium Zinc Tellu-

图4 人工智能引入能谱CT材料分析^[9]

ride, CZT)探测器路线。CZT是在CdTe基础上引入锌元素形成的化合物半导体,能够兼顾较高的X射线吸收效率与良好的能量分辨能力。Canon Medical还强调,其紧凑型读出电路有助于提高探测器有效面积,从而改善几何剂量效率^[12]。

国内企业在能谱CT硬件上也进展迅速。近年来,联影、东软等国产厂商已逐渐完成从传统CT到双能CT,再到光子计数CT的技术布局。联影(United Imaging)医疗推出的uCT Ultima光子计数CT与东软(Neusoft)医疗的NeuViz P10光子计数CT均已获得国家药品监督管理局批准上市,标志着我国在光子计数CT领域也进入了国际研发前列。图5展示了联影光子计数能谱CT的超高分辨率成像效果。

总体趋势上,能谱CT在临床中正在从“可选的检查”向“例行信息检查”的方向演进:其中,双能CT已经较为成熟地融入临床诊断流程,被视为下一代发展希望的光子计数CT以其更高空间分辨率、更优的对比噪声比和更精细的物质分辨能力,为更多的临床应用提供了可能。

四、临床与科研应用

能谱CT在临床中的应用场景日益广泛,并逐

渐成为某些疾病诊断中的关键工具。在心血管成像中,能谱CT能够有效区分不同成分的冠脉斑块(纤维、脂质、钙化),减少高密度钙化带来的伪影干扰,提高冠脉狭窄定量评估的准确性^[14]。同时,基于能谱的虚拟单能图像可改善支架和钙化区域的可视化,增强了对微小狭窄和冠脉搭桥术后血管通畅性的判断^[15]。

在风湿病学和骨科领域,能谱CT能够通过尿酸盐与钙盐的物质分解,实现痛风性关节炎与骨关节炎的精准鉴别,避免重复性穿刺检查^[16]。在脊柱疾病、骨质疏松与骨折风险评估中,能谱参数也为骨代谢状态提供了新的影像学参考。

在肿瘤影像学方面,能谱CT通过碘映射能够反映肿瘤的血供情况,对于肿瘤的分期和治疗反应评估具有重要意义^[17]。在放射治疗领域,能谱CT能够提供电子密度和相对原子序数等关键参数,从而提升质子和碳离子等粒子治疗的射程预测精度,为治疗计划优化提供坚实的数据支持^[18]。表1总结了与传统CT相比,能谱CT在多个医学应用方面展示出的优势效果。

除医学成像外,能谱CT在材料科学、安检及考古等领域同样具有重要应用价值,可实现复杂材料的高精度成分分解、危险品识别以及文物无损分析等功能^[19-20]。

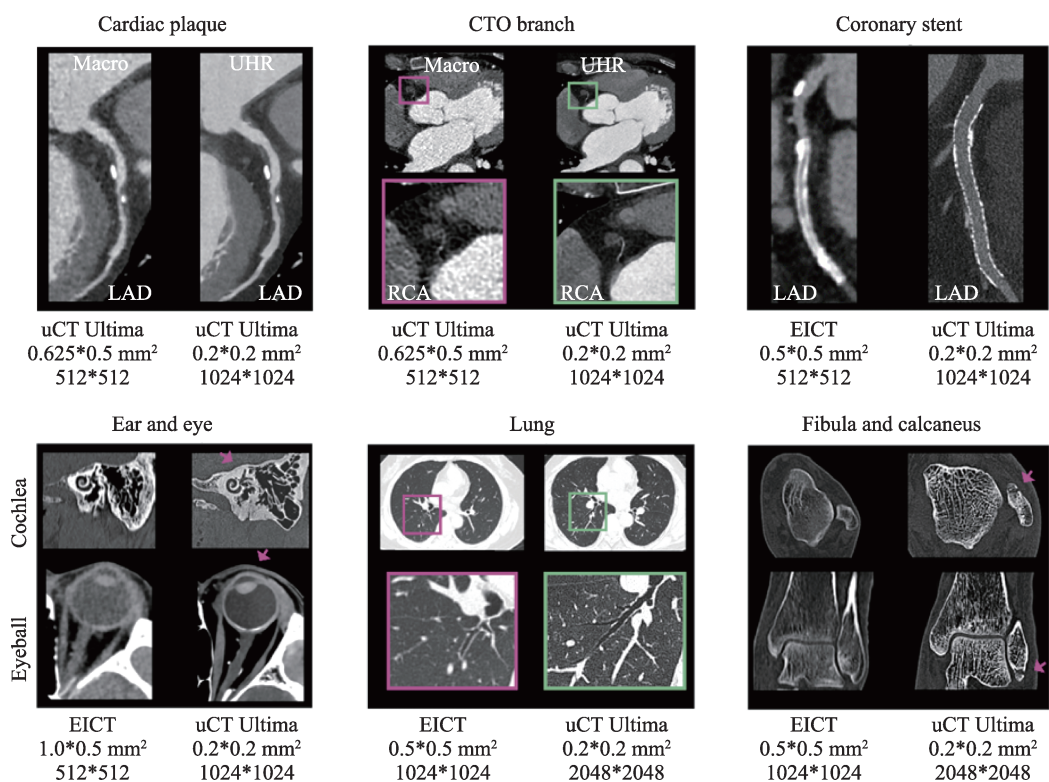


图5 联影uCT Ultima光子计数CT的超高分辨率成像效果^[13]

表1 能谱CT与传统CT在部分医学应用中的对比

应用方向	传统CT局限	能谱CT优势
心血管成像 ^[14,15]	钙化和支架伪影明显，难以评估狭窄程度	可区分斑块成分，提高血管显示能力
痛风与骨病 ^[16]	难以区分尿酸盐与钙盐沉积	可实现材料分解和成分鉴别
肿瘤诊断 ^[17]	组织对比度有限，难以评估血供	可进行碘定量分析和虚拟单能成像
放射治疗 ^[18]	难以准确获取电子密度等参数	可提供更准确的物理参数用于剂量计算

五、挑战与不足

尽管能谱CT前景广阔，但在发展过程中仍面临诸多挑战。首先，设备价格昂贵，硬件维护和升级成本较高，这在一定程度上限制了其在基层医院的普及。其次，数据处理的复杂性也是一个难点，不同厂商的硬件设计和算法策略存在差异，导致影像结果缺乏统一性，临床推广中亟需标准化和规范化。此外，如何在确保高图像质量的同时进一步降低辐射剂量，是未来能谱CT必须面对的问题。值

得注意的是，目前许多能谱CT临床应用仍停留在研究或探索阶段，缺乏大规模临床数据支撑，这也影响了医生和患者的接受度^[21]。

六、未来展望

展望未来，能谱CT有望迎来更广阔的发展空间。一方面，随着光子计数探测器逐渐成熟并普及，其在能谱分辨率和低剂量成像方面的优势将改变临床影像学格局。另一方面，人工智能的持续发展将进一步赋能能谱CT，使得图像重建、材料分解和疾病预测更加高效、精准。同时，能谱CT提供的多参数信息有望与分子影像学、功能成像等新兴技术相结合，推动影像诊断向更综合、更精准的方向发展。在医学之外，其跨学科应用也将不断扩展，为工业检测、环境科学甚至文化遗产保护等领域提供新的工具。随着硬件创新、软件进步与临床循证的不断积累，能谱CT将成为未来医学影像学的重要里程碑，推动精准医学和个体化医疗迈上新台阶。

综上所述,能谱CT作为CT技术发展的重要分支,凭借其在成像质量、材料分解、定量分析等方面的独特优势,正逐步走向临床应用与科研前沿。它不仅弥补了传统CT的不足,更为精准医疗、放射治疗及跨学科研究提供了新的可能^[22]。尽管当前仍存在成本、标准化和辐射剂量控制等方面的挑战,但随着技术的不断突破和应用的不断拓展,能谱CT的前景值得期待。可以预见,在未来医学影像的发展道路上,能谱CT将扮演越来越重要的角色,成为推动医学与科学进步的核心动力。

参考文献

- [1] Hounsfield GN. Computerized transverse axial scanning (tomography). 1. Description of system. *Br J Radiol.* 1973 Dec;46(552): 1016-22.
- [2] Garnett R. A comprehensive review of dual-energy and multi-spectral computed tomography[J]. *Clinical imaging*, 2020, 67: 160-169.
- [3] Johnson TR. Dual-energy CT: general principles. *AJR Am J Roentgenol.* 2012 Nov; 199(5 Suppl): S3-8.
- [4] Odedra D, Narayanasamy S, Sabongui S, Priya S, Krishna S and Sheikh A (2022) Dual Energy CT Physics—A Primer for the Emergency Radiologist. *Front. Radiol.* 2:820430.
- [5] Taguchi K, Iwanczyk JS. Vision 20/20: Single photon counting x-ray detectors in medical imaging. *Med Phys.* 2013 Oct; 40(10): 100901.
- [6] Greffier J, Viry A, Robert A, Khorsi M, Si-Mohamed S. Photon-counting CT systems: A technical review of current clinical possibilities. *Diagn Interv Imaging.* 2025 Feb; 106(2): 53-59.
- [7] Pourmorteza A, Symons R, Sandfort V, Mallek M, Fuld MK, Henderson G, Jones EC, Malayeri AA, Folio LR, Bluemke DA. Abdominal Imaging with Contrast-enhanced Photon-counting CT: First Human Experience. *Radiology.* 2016 Apr; 279(1): 239-45.
- [8] Li, S., Li, H., Li, Y. et al. Photon-counting Raman spectroscopy at a MHz spectral rate for biochemical imaging of an entire organism. *Nat Commun* 16, 3808 (2025).
- [9] Rajagopal, J. R., Rapaka, S., Farhadi, F. et al. Development of a deep learning based approach for multi-material decomposition in spectral CT: a proof of principle in silico study. *Sci Rep* 15, 28814 (2025).
- [10] Greffier J, Villani N, Defez D, et al. Spectral CT imaging: technical principles of dual-energy CT and multi-energy photon-counting CT [J]. *Diagnostic and Interventional Imaging*, 2023, 104(4): 167-177.
- [11] GE HealthCare. GE HealthCare's Photonova Spectra photon-counting CT receives FDA clearance[EB/OL]. (2026-03-23)[2026-05-11]. <https://investor.gehealthcare.com/news-releases/news-release-details/ge-healthcares-photonova-spectra-photon-counting-ct-receives-fda>.
- [12] Canon Inc. Canon launches research collaboration with Penn Medicine for photon-counting CT[EB/OL]. (2024-11-27) [2026-05-12]. <https://global.canon/en/news/2024/20241127.html>.
- [13] Yang W, Qin W, Ji X, et al. The dawn of photon-counting CT and its clinical revolution in China[J]. *The Innovation*, 2026, 7(2).
- [14] 陈真婧, 沈伟强, 朱华勇, 郑昊, 樊树峰. 能谱CT成像对颈动脉粥样硬化斑块成分的分析[J]. *中华全科医学*, 2016, 14(3): 449-451, 458.
- [15] 刘琪, 窦勇, 王雅玲, 邓勇志等. 宝石能谱CT高分辨模式成像对提高冠状动脉支架显示中的应用价值[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2024(7): 87-89.
- [16] 薛杨, 卢山. 能谱CT不同指标对痛风诊断价值的比较研究[J]. *国际内分泌代谢杂志*, 2022, 42(4): 298-302.
- [17] 岳倩倩, 王新怡, 杨志强, 等. 富血供肝脏转移瘤与肝细胞肝癌的能谱CT成像定量分析[J]. *山东大学学报(医学版)*, 2016, 54(7): 50-55.
- [18] Li W, Feng H, Liu C, et al. Advancing carbon ion therapy with dual-energy CT: Enhanced elemental decomposition for precise range and secondary dose estimation[J]. *Physica Medica*, 2025, 133: 104960.
- [19] Vrbaški S, Gajic-Kvascev M, Crkvenjakov D K, et al. Dual-energy computed tomography for non-destructive characterization of pigments in cultural heritage[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2025, 73: 19-27.
- [20] Khan S U, Ullah I, Ahmed I, et al. Directional weighted spatial fuzzy C-means for segmentation of brain MRI images: (Journal of X-ray Science & Technology, Vol 27, No 6, pp. 1087-1099, 2019)[J]. *Journal of X-Ray Science and Technology*, 2020, 28(1): 185-185.
- [21] Rajendran K, Petersilka M, Henning A, Shanblatt ER, Schmidt B, Flohr TG, Ferrero A, Baffour F, Diehn FE, Yu L, Rajiah P, Fletcher JG, Leng S, McCollough CH. First Clinical Photon-counting Detector CT System: Technical Evaluation. *Radiology.* 2022 Apr; 303(1): 130-138.
- [22] McCollough CH, Boedeker K, Cody D, Duan X, Flohr T, Halliburton SS, Hsieh J, Layman RR, Pelc NJ. Principles and applications of multienergy CT: Report of AAPM Task Group 291. *Med Phys.* 2020.