



双能量CT电子密度和有效原子序数测量的研究进展

鲁新亮, 刘云福, 张永县, 刘丹丹, 牛延涛

Advances in Measurements of Electron Density and Effective Atomic Number Using Dual-energy Computed Tomography

LU Xinliang, LIU Yunfu, ZHANG Yongxian, LIU Dandan, and NIU Yantao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2024.111>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

胰腺导管腺癌CT能谱成像参数的定量分析及潜在应用价值

The Characteristics and Its Potential Application Value of Pancreatic Ductal Adenocarcinoma with Single-source Dual Energy Spectral CT Imaging
CT理论与应用研究. 2022, 31(5): 647-654

双能量CT在痛风诊断和评估中的研究进展

Dual-energy CT in Gout: Advances in Diagnosis and Assessment
CT理论与应用研究. 2019, 28(4): 513-518

InferRead软件测量肺纯磨玻璃结节体积的准确性评价

Evaluation of the Accuracy of Infer Read Software in Measuring the Volume of Pure Ground Glass Nodules in the Lung
CT理论与应用研究. 2022, 31(5): 669-678

双能CT对甲状腺结节诊断效能与病理学类型的相关性研究

Research on the Correlation between Diagnostic Efficacy and Pathological Type of Dual-energy CT in Thyroid Nodules
CT理论与应用研究. 2021, 30(5): 611-618

双能量CT虚拟单能量成像在鉴别脊柱急性慢性压缩骨折中的应用价值

The Application Value of Dual-Energy CT Virtual Monoenergetic Imaging in the Differential Diagnosis of acute and Chronic Spinal Compression Fractures
CT理论与应用研究. 2021, 30(2): 209-216

基于人工智能的CT肺结节检出影响因素分析: 体模研究

Analysis of Influencing Factors on Pulmonary Nodule Detection by Computed Tomography with Artificial Intelligence: A Phantom Study
CT理论与应用研究. 2024, 33(4): 471-477



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

鲁新亮, 刘云福, 张永县, 等. 双能量 CT 电子密度和有效原子序数测量的研究进展[J]. CT 理论与应用研究 (中英文), 2024, 33(6): 740-746. DOI:10.15953/j.ctta.2024.111.

LU X L, LIU Y F, ZHANG Y X, et al. Advances in Measurements of Electron Density and Effective Atomic Number Using Dual-energy Computed Tomography[J]. CT Theory and Applications, 2024, 33(6): 740-746. DOI:10.15953/j.ctta.2024.111. (in Chinese).

双能量 CT 电子密度和有效原子序数测量的研究进展

鲁新亮, 刘云福, 张永县, 刘丹丹, 牛延涛[✉]

首都医科大学附属北京同仁医院放射科, 北京 100730

摘要: 在双能量 CT 多参数功能分析中, 电子密度和有效原子序数的精确测量是实现精准影像诊断和辐射剂量估算的基础。本文综述不同双能量成像模式 CT 在测量电子密度和有效原子序数准确性方面的研究进展, 旨在为影像诊断和治疗计划的研究和临床应用提供参考。

关键词: 双能量 CT; 电子密度; 有效原子序数; 模体

DOI:10.15953/j.ctta.2024.111

中图分类号: R814.42

文献标识码: A

双能量 CT (dual-energy computed tomography, DECT) 作为一种较为先进的成像技术, 已广泛应用于临床实践。DECT 利用物质在不同 X 射线能量下的衰减特性, 获取高能量和低能量图像数据, 从而实现单能量成像、物质成分分离和定量分析^[1-3]。

在物质的定量分析中, 电子密度 (electron density, ED) ρ_e 和有效原子序数 (effective atomic number, EAN) Z_{eff} 不仅用于结石成分分类和肿瘤良恶性鉴别, 还被用于放射治疗的蒙特卡洛剂量估算和放疗后放射性肺炎的分级评估^[4-9]。因此, 准确测量 ρ_e 和 Z_{eff} 是实现精准影像诊断和精确剂量估算的基础。虽然已有一些研究探讨了在 DECT 中测量 ρ_e 和 Z_{eff} 的准确性, 但由于使用的 CT 机型 (双能量成像模式)、扫描和重建参数等存在差异, 导致这些研究结果难以进行比较。

本文综述近年来相关的文献研究, 分析影响 ρ_e 和 Z_{eff} 测量准确性的关键因素, 探讨提高这些参数测量精度的方法, 旨在提高影像诊断和治疗的精确性。

1 ρ_e 和 Z_{eff} 的影响因素

常规 CT 图像的生成是基于不同物质对 X 射线的衰减程度的差异, 这些差异通常用衰减系数 μ 来量化, 并以 Hounsfield 单位 (HU) 表示。因此在临床实践中, 组织的 HU 值可能会因光子能量和扫描参数的变化而发生改变。此外, 不同的组织也会表现出相同的 HU 值, 这种现象源于衰减系数 μ 不仅受到光子能量的影响, 还与组织密度和元素组成密切相关。1976 年, Rutherford 等^[10]提出利用不同能量的 X 射线对同一解剖结构进行至少两次扫描, 以获取不同能量下的图像, 进而推导出衰减系数 μ 与 ρ_e 和 Z_{eff} 之间的关系。

目前, 双能量成像作为主流的能谱 CT 技术, 其 X 射线能量的解析方法会间接影响 ρ_e 和 Z_{eff} 的计算结果。能量解析主要有两种方法: 基于投影数据域的解析和基于图像域的解析^[11]。前者通过减少射线束硬化效应, 提高了解析的准确性, 但计算过程更为复杂且对噪声更加敏感; 后者则在计算简便性和对噪声的抗干扰能力上具有优势^[12]。总之, 射线束硬化效应和噪声都可能对物质的衰减系数 μ 造成干扰, 进而影响对组织 ρ_e 和 Z_{eff} 的测量精度。

1.1 射线束硬化效应的影响

CT 系统采用多色能谱 X 射线技术, 在 X 射线穿透介质的过程中, 大量低能 X 射线被吸收衰减,

而高能 X 射线的衰减相对较少, 导致透射线束中的高能 X 射线比例提高, 出现“射线束硬化”的现象^[13]。在这过程中, 衰减系数 μ 发生了变化。然而, 在图像重建过程中, 通常假设 X 射线能谱为单色, 即认为衰减系数 μ 是恒定不变的。这种假设会导致实际的衰减系数 μ 与假定值之间出现偏差, 进而影响到 ρ_e 和 Z_{eff} 的测量精度。

随着被测物体体积的增大, 射线束硬化效应变得更加显著, 这将导致 ρ_e 和 Z_{eff} 的测量误差进一步增大。Schaeffer 等^[14]在研究中指出, 在较小尺寸的头部模型中, ρ_e 和 Z_{eff} 的测量值比在较大尺寸的体部模型中更为精确。然而, Almeida 等^[15]的研究结果与之不同, 在两种不同尺寸的模型中, ρ_e 和 Z_{eff} 的测量值并无显著差异, 这可能源于事先使用模体进行了 ρ_e 和 Z_{eff} 的校准, 有效地校正了射线束硬化效应。值得注意的是, 尽管 Hua 等^[16]没有使用模体进行校准, 但他们的研究结果与 Almeida 等^[15]相似, 发现两种尺寸模型中 ρ_e 和 Z_{eff} 的测量值差异控制在 0.7% 和 2% 以内。这可能与他们使用的双层探测器 CT 技术有关, 该技术能够实现基于投影数据材料分解, 有效减轻射线束硬化的影响。

除体型尺寸外, 扫描中心的偏移也是影响射线束硬化效应的一个重要因素。Schaeffer 等^[14]发现, 当模体在上下左右 4 个方向上发生偏移时, Z_{eff} 会有 3% 的变化, 而 ρ_e 则相对不敏感。尽管 Z_{eff} 的变化幅度不大, 但这足以对物质的鉴别造成影响。例如, 在偏离等中心点的模体中, 血液等效组织插件 (40 HU) 的 Z_{eff} 与未发生偏移模体中的水等效组织插件的 Z_{eff} 相近。由于扫描位置受到受检者特异性及摆位技师判断偏倚的影响, 难以通过其他方法进行校正, 因此, 制定标准化的摆位流程对于提高 ρ_e 和 Z_{eff} 测量的准确性至关重要。

1.2 噪声的影响

噪声具有随机性、不确定性, 会干扰正常信号的接收与处理。在 CT 成像领域, 噪声的存在不仅影响图像的纹理, 还会导致衰减系数 μ 的测量值与其真实值之间存在偏差。在临床实践中, 降低噪声对于提升 CT 图像质量至关重要。为了减少噪声对衰减系数 μ 测量的影响, 提高 ρ_e 和 Z_{eff} 的测量精度, 选择恰当的扫描参数和应用高效的噪声抑制技术显得尤为关键。

CT 噪声主要与探测器接收的 X 射线光子量有关, 增加 X 射线能量或扫描剂量可以降低噪声水平。Landry 等^[17]的研究表明, 随着曝光剂量的增加, 模体中脂肪、水、肌肉等效组织插件的 ρ_e 和 Z_{eff} 的区分度提高, 同时在近距离放疗的蒙特卡洛模拟中, 剂量计算的误差也相应减小。然而, Hua 等^[16]的研究发现, 在不同的管电压和剂量水平下, ρ_e 和 Z_{eff} 的测量展现出较高的准确性和稳定性。这一结果可能与 Hua 等^[16]使用的曝光剂量范围较窄, 而 Landry 等^[17]则采用了 0.5 至 4 倍的剂量范围有关。

除了剂量和能量外, 迭代算法也是影响 CT 噪声的关键因素。与传统的滤波反投影 (filtered back projection, FBP) 算法相比, 迭代重建算法有效地降低了图像噪声并提高了图像质量^[18-20]。Landry 等^[17]发现正弦图确定迭代重建 (sinogram-affirmed iterative reconstruction, SAFIRE) 算法在降低 ρ_e 和 Z_{eff} 的标准偏差方面表现优于 FBP 算法, 尤其在使用最大强度时。也有其他研究指出, ρ_e 和 Z_{eff} 的测量精度与迭代重建算法的强度并无明显关联^[16, 21], 这可能与不同研究中使用的 CT 机品牌和型号有关。

除了上述参数, 层厚、螺距、旋转时间、卷积核等其他扫描参数同样对 CT 噪声有着显著影响, 这些因素对 ρ_e 和 Z_{eff} 测量准确性的影响值得进一步研究和探讨。

2 不同双能量成像模式 CT 对 ρ_e 和 Z_{eff} 的测量研究

根据不同的双能量实现方式, DECT 可分为单源瞬时管电压切换模式、单源序列扫描模式、双源双能量扫描模式、单源双光束模式和单源双层探测器模式^[22] (图 1)。DECT 通过获取物质在两种不同能量下的 X 射线衰减信息, 利用物质在不同能量下的衰减差异进行物质分解和定量分析 (图 2 和图 3)。

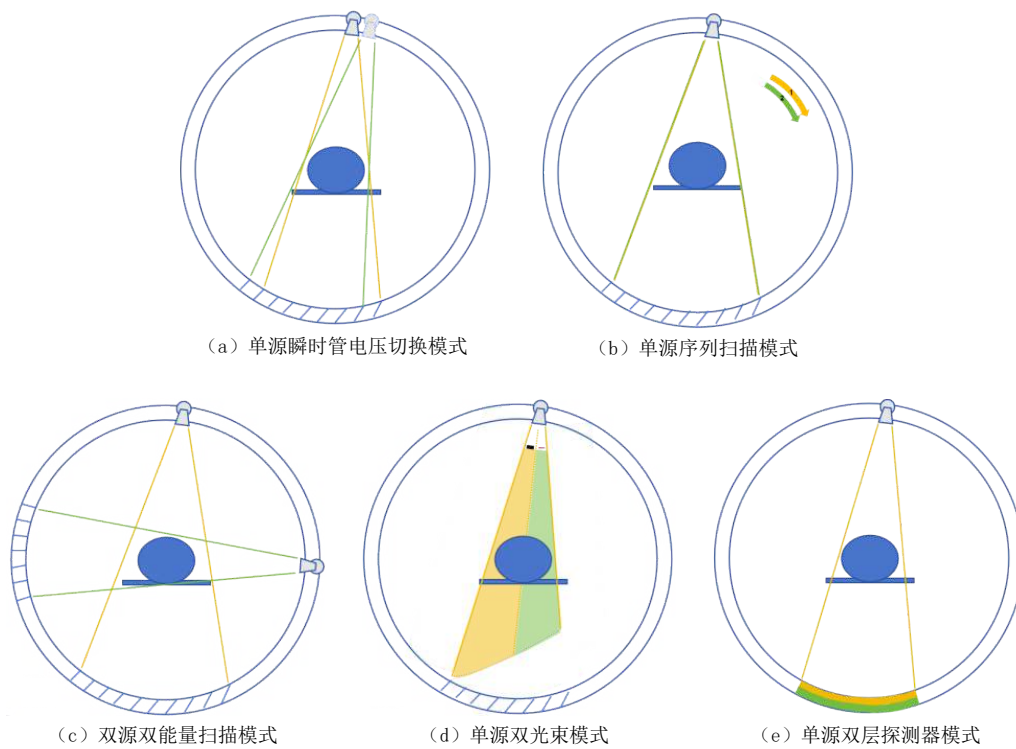
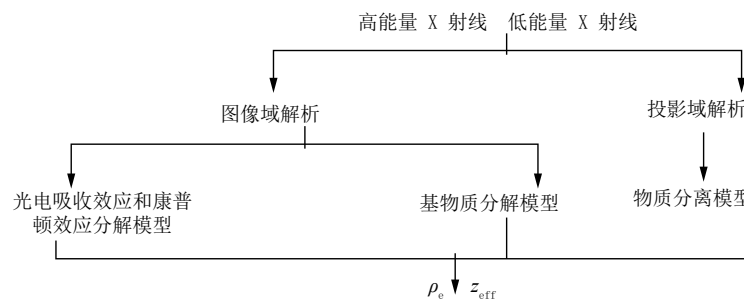
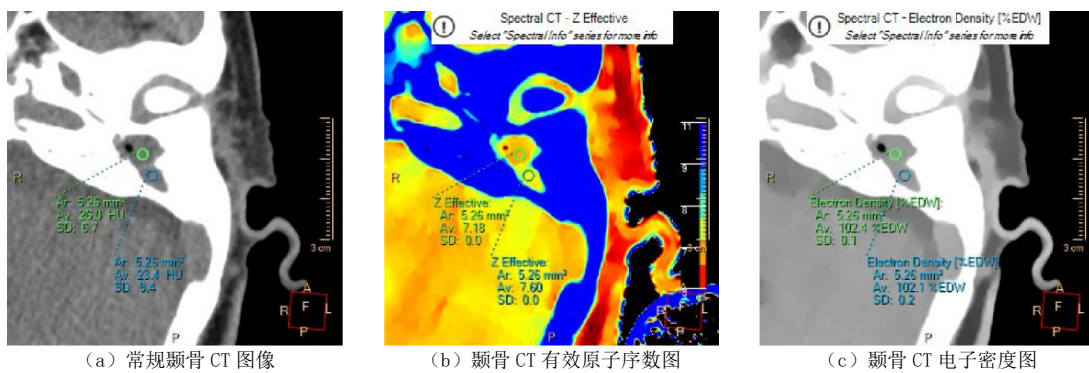


图 1 双能量 CT 的不同成像模式

Fig.1 Different imaging modes of dual-energy CT

图 2 电子密度和有效原子序数的计算原理^[23]Fig.2 Calculation principles of electron density and effective atomic number^[23]

注: 女, 61 岁, 胆脂瘤伴肉芽肿。

图 3 电子密度和有效原子序数在胆脂瘤患者中的应用

Fig.3 Application of electron density and effective atomic number in patients with cholesteatoma.

(1) 单源瞬时管电压切换模式 DECT 可在机架旋转期间实现高低电压的快速切换, 尽管 X 射线投影角度几乎相同, 允许基于投影数据域进行能量解析, 但由于时间分辨力的损失, 会在一定程度上影响能量解析的准确性。

当前的研究在评估 Z_{eff} 测量的准确性方面展现了不同结果^[21, 24, 25]。例如, Goodsitt 等^[24]通过模体实验得出 Z_{eff} 的测量相对误差控制在 15% 以内的结论。相对地, Kawahara 等^[25]报告称 Z_{eff} 的测量相对误差在 5.1% 以内。这种差异可能是因为各研究中所采用的 CT 机型和扫描参数不同, 以及模体材料和结构的多样性所致。在 ρ_e 测量的准确性方面, Ogata 等^[26]发现在不同单能级图像中, 模体所有材料的 ρ_e 测量相对误差控制在 1.1% 以内。目前, 基于单源瞬时管电压切换模式的 DECT 测量 ρ_e 准确性的研究相对较少, 未来可进一步探索。

(2) 单源序列扫描模式 DECT 分别以高、低能量进行两次扫描实现双能量成像。两套独立的高低能量图像具有完全的能量分离效果, 这种特性有助于提高 ρ_e 和 Z_{eff} 的测量准确性。当前, 相关研究表明 ρ_e 和 Z_{eff} 的测定具有较高的精度, 有助于提高放射治疗计划的准确性^[14, 27-29]。其中 Schaeffer 等^[14]基于模体实验发现 Z_{eff} 的测量相对误差为 3.2%, 并且认为与 Kawahara 等^[25]基于单源瞬时管电压切换模式 DECT 的研究结果相似 (Z_{eff} 的测量相对误差为 2.5%)。

在单源序列扫描成像模式下, 两次球管旋转扫描之间存在一定的间隔 (如某品牌 CT 高低管电压扫描间隔为 180~800 ms^[28]), 可能会影响空间配准效果, 并且在临床实践中由于受到受检者运动的影响, 导致材料分解存在偏差^[30]。此外, 较大的能谱分离效果有助于产生更好的材料区分效果, 提高 ρ_e 和 Z_{eff} 的准确性。目前单源序列扫描模式 DECT 的高能量成像多采用 135 kVp 的管电压, 能谱分离效果略低于单源瞬时管电压切换模式 DECT 的 140 kVp^[25]。

(3) 双源双能量扫描模式 DECT 具有较大的能谱分离优势, 它采用两套 X 射线球管和探测器, 对同一解剖平面分别发射高、低管电压的 X 射线并由相应的探测器采集数据。

随着技术的进步, 目前双源 DECT 多采用能谱纯化技术进一步增大能谱分离效果, 减少射线束硬化伪影, 提高了 ρ_e 和 Z_{eff} 的测量准确性^[15, 31-32]。然而, 两套探测器的空间位置设计也会对 ρ_e 和 Z_{eff} 的测量带来一定的影响, 仅 35.5 cm 的全扫描视野, 对于超力型成年受检者的 ρ_e 和 Z_{eff} 的测量具有局限性。此外, 鉴于高、低能量数据采集的相位差异, 该双能量 CT 采用了一种对噪声反应更为敏感的图像域能量解析技术。然而, 当两套探测器同时捕获高能和低能 X 射线时, 交叉散射的产生是不可避免的, 这种散射会加剧噪声, 从而可能对 ρ_e 和 Z_{eff} 的精确测量带来不利影响。

(4) 单源双光束模式 DECT 采用分离滤波技术, 使 X 射线束预先分离成高、低能量的两种光子束, 由对应位置的探测器沿 Z 轴方向分别接收, 使得同一解剖区域接收高、低能两种 X 射线束存在时间差异, 同样地基于图像域进行能量解析。尽管该模式 DECT 在成像过程中也容易受到光子交叉、散射等影响, 但是相关研究发现单源双光束模式 DECT 在测量 ρ_e 和 Z_{eff} 的准确性方面劣于双源 DECT^[15]。该研究发现第 2 代、第 3 代双源 DECT 的 ρ_e 和 Z_{eff} 的测量相对误差分别在 1.2% 和 6.2% 以内, 然而单源双光束 DECT 的 ρ_e 和 Z_{eff} 的测量相对误差最大可达 15.3% 和 28.1%。较大的测量误差可能源于单源双光束 DECT 的高能和低能数据均源自相同的管电压设置, 这种设计导致能谱分离效果相对较弱, 从而使得成像系统对图像噪声和伪影更为敏感, 影响了 ρ_e 和 Z_{eff} 的准确性。

(5) 单源双层探测器模式 DECT 同样对高能和低能数据采用了相同的管电压设置, 并且存在使用相同管电流所致的高、低能光谱图像的噪声水平不同的局限, 但相关研究显示了稳健的 ρ_e 和 Z_{eff} 的测量准确性^[16, 33]。

Hua 等^[16]基于模体实验发现 ρ_e 的测量相对误差范围在 -0.1% 至 1.1%, Z_{eff} 的测量相对误差范围为 -2.3% 至 1.7%。这些发现可以归因于该模式的 DECT 采用了独特的设计: 一个 X 射线球管与空间上对称分布的上下两层探测器相结合。这种双层探测器配置能够同步捕获高、低能量的 X 射线信息, 实现了基于投影数据域的材料分解^[34]。从理论上讲, 这种方法相较于基于图像域的材料分解具有一定的优势。

3 总结与展望

DECT 根据不同能量下物质衰减系数 μ 的差异进行物质分解, 以实现单能量 CT 扫描无法评估的物质特性, 其中 ρ_e 和 Z_{eff} 在评估材料特性和放疗剂量估算中发挥着重要的作用。本文重点探讨影响 ρ_e 和 Z_{eff} 测量精度的射线束硬化效应和噪声两大关键因素, 并详细分析不同双能量成像模式 CT 对 ρ_e 和 Z_{eff} 测量准确性的具体影响, 明确了各成像模式的优势与局限。

鉴于此, 未来的研究需进一步探索和优化算法, 以减轻射线束硬化效应和噪声的不利影响, 从而提升图像质量和测量的精确度。同时, 由于不同双能量成像模式 CT 对 ρ_e 和 Z_{eff} 测量准确性的差异化影响, 未来的工作还需对这些成像模式进行细致的比较研究, 并针对不同双能量成像模式 CT, 探索所使用机型的最佳成像条件以提高 ρ_e 和 Z_{eff} 的测量准确性。

参考文献

- [1] AGOSTINI A, BORGERHERESI A, MARI A, et al. Dual-energy CT: Theoretical principles and clinical applications[J]. *La Radiologia Medica*, 2019, 124(12): 1281-1295.
- [2] PATINO M, PROCHOWSKI A, AGRAWAL M D, et al. Material separation using dual-energy CT: Current and emerging applications[J]. *Radiographics*, 2016, 36(4): 1087-1105.
- [3] WANG A S, HSIEH S S, PELC N J. 双能 CT 的基本原理、应用和未来展望[J]. *CT 理论与应用研究*, 2012, 21(3): 367-386. (in English).
WANG A S, HSIEH S S, PELC N J. A review of dual energy CT: Principles, applications, and future outlook[J]. *CT Theory and Applications*, 2012, 21(3): 367-386.
- [4] OHIRA S, WASHIO H, YAGI M, et al. Estimation of electron density, effective atomic number and stopping power ratio using dual-layer computed tomography for radiotherapy treatment planning[J]. *Physica Medica*, 2018, 56: 34-40.
- [5] ZHAO W, SHEN S, KE T, et al. Clinical value of dual-energy CT for predicting occult metastasis in central neck lymph nodes of papillary thyroid carcinoma[J]. *European Radiology*, 2024, 34(1): 16-25.
- [6] ONISHI S, FUJIOKA C, KAICHI Y, et al. Utility of dual-energy CT for predicting the vascularity of meningiomas[J]. *European Journal of Radiology*, 2020, 123: 108790.
- [7] BHARATI A, RANI MANDAL S, GUPTA A K, et al. Non-invasive characterisation of renal stones using dual energy CT: A method to differentiate calcium stones[J]. *Physica Medica*, 2022, 101: 158-164.
- [8] 赵聪, 刘兰平, 汤良, 等. 双肺电子密度值和放疗模式与 NSCLC 放射性肺炎发生相关性[J]. *中华肿瘤防治杂志*, 2017, 24(18): 1305-1309. DOI:10.16073/j.cnki.cjcpt.2017.18.009.
ZHAO C, LIU L P, TANG L, et al. Effects of different chemotherapeutic models and double lung electron density value on the occurrence of radiation pneumonia of stage III NSCLC[J]. *Chinese Journal of Cancer Prevention and Treatment*, 2017, 24(18): 1305-1309. DOI:10.16073/j.cnki.cjcpt.2017.18.009. (in Chinese).
- [9] KONIETZKE P, STEENTOFT H H, WAGNER W L, et al. Consolidated lung on contrast-enhanced chest CT: The use of spectral-detector computed tomography parameters in differentiating atelectasis and pneumonia[J]. *Heliyon*, 2021, 7(5): e07066. DOI:10.1016/j.heliyon.2021.e07066.
- [10] RUTHERFORD R A, PULLAN B R, ISHERWOOD, I. Measurement of effective atomic number and electron density using an EMI scanner[J]. *Neuroradiology*, 1976, 11(1): 15-21.
- [11] LI Z, RAVISHANKAR S, LONG Y, et al. Learned mixed material models for efficient clustering based dual-energy CT image decomposition[C]//2018 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP). IEEE, 2018: 529-533.
- [12] 郭俏, 姚旭峰. 双能 CT 图像域基材料分解算法的研究进展[J]. *CT 理论与应用研究*, 2023, 32(1): 139-146. DOI:10.15953/j.ctta.2021.067.
GUO Q, YAO X F. Progress of material decomposition algorithms in dual-energy CT imaging[J]. *CT Theory and Applications*, 2023, 32(1): 139-146. DOI:10.15953/j.ctta.2021.067. (in Chinese).
- [13] BROOKS R A, Di CHIRO G. Beam hardening in X-ray reconstructive tomography[J]. *Physics in Medicine & Biology*, 1976, 21(3): 390-398.
- [14] SCHAEFFER C J, LEON S M, OLGUIN C A, et al. Accuracy and reproducibility of effective atomic number and electron density measurements from sequential dual energy CT[J]. *Medical Physics*, 2021, 48(7): 3525-3539.
- [15] ALMEDIDA I P, SCHYNS L E, ÖLLERS M C, et al. Dual-energy CT quantitative imaging: A comparison study

- between twin-beam and dual-source CT scanners[J]. *Medical Physics*, 2017, 44(1): 171-179.
- [16] HUA C H, SHAPIRA N, MERCHANT T E, et al. Accuracy of electron density, effective atomic number, and iodine concentration determination with a dual-layer dual-energy computed tomography system[J]. *Medical Physics*, 2018, 45(6): 2486-2497.
- [17] LANDRY G, GAUDREAU M, Van ELMPT W, et al. Improved dose calculation accuracy for low energy brachytherapy by optimizing dual energy CT imaging protocols for noise reduction using sinogram affirmed iterative reconstruction[J]. *Zeitschrift für Medizinische Physik*, 2016, 26(1): 75-87.
- [18] RGEL A, BIER G, HENNERSDORF F, et al. Image quality of CT angiography of supra-aortic arteries: Comparison between advanced modelled iterative reconstruction (ADMIRE), sinogram affirmed iterative reconstruction (SAFIRE) and filtered back projection (FBP) in one patients' group[J]. *Clinical Neuroradiology*, 2020, (1). DOI:[10.1007/s00062-018-0740-y](https://doi.org/10.1007/s00062-018-0740-y).
- [19] 徐同江, 王旭, 李艳, 等. IMR、iDose4 和 FBP 三种重建算法在隆鼻整形术 CT 扫描的应用研究[J]. *CT 理论与应用研究*, 2022, 31(3): 357-364. DOI:[10.15953/j.ctta.2021.072](https://doi.org/10.15953/j.ctta.2021.072).
XU T J, WANG X, LI Y, et al. Application of IMR, iDose4 and FBP reconstruction algorithms in CT scanning of rhinoplasty[J]. *CT Theory and Applications*, 2022, 31(3): 357-364. DOI:[10.15953/j.ctta.2021.072](https://doi.org/10.15953/j.ctta.2021.072). (in Chinese).
- [20] DE M P, ORIGGI D. New adaptive statistical iterative reconstruction ASiR-V: Assessment of noise performance in comparison to ASiR[J]. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 2018, 19(2): 275-286. DOI:[10.1002/acm2.12253](https://doi.org/10.1002/acm2.12253).
- [21] 田璐, 黄红云, 范杰. 双能 CT 螺距和迭代重建权重对单能衰减和有效原子序数的影响: 体模研究[J]. *中国医学影像技术*, 2023, 39(1): 99-103. DOI:[10.13929/j.issn.1003-3289.2023.01.023](https://doi.org/10.13929/j.issn.1003-3289.2023.01.023).
TIAN L, HUANG H Y, FAN J. Impact of pitch and iterative reconstruction weight on monochromatic attenuation and effective atomic number of dual-energy CT: A phantom study[J]. *Chinese Journal of Medical Imaging Technology*, 2023, 39(1): 99-103. DOI:[10.13929/j.issn.1003-3289.2023.01.023](https://doi.org/10.13929/j.issn.1003-3289.2023.01.023). (in Chinese).
- [22] 中华医学会放射学分会, 中国医师协会放射医师分会, 安徽省影像临床医学研究中心. 能量 CT 临床应用中国专家共识[J]. *中华放射学杂志*, 2022, 56(5): 476-487.
- [23] ALKADHI H, EULER A, MAINTZ D, et al. Spectral imaging: Dual-energy, multi-energy and photon-counting CT[M]. Cham: Springer International Publishing, 2022.
- [24] GOODSITT M M, CHRISTODOULOU E G, LARSON S C. Accuracies of the synthesized monochromatic CT numbers and effective atomic numbers obtained with a rapid kVp switching dual energy CT scanner[J]. *Medical Physics*, 2011, 38(4): 2222-2232. (in Chinese).
- [25] KAWAHARA D, OZAWA S, YOKOMACHI K, et al. Synthesized effective atomic numbers for commercially available dual-energy CT[J]. *Reports of Practical Oncology & Radiotherapy*, 2020, 25(4): 692-697.
- [26] OGATA T, UEGUCHI T, YAGI M, et al. Feasibility and accuracy of relative electron density determined by virtual monochromatic CT value subtraction at two different energies using the gemstone spectral imaging[J]. *Radiation Oncology*, 2013, 8: 83.
- [27] TATSUGAMI F, HIGAKI T, KIGUCHI M, et al. Measurement of electron density and effective atomic number by dual-energy scan using a 320-detector computed tomography scanner with raw data-based analysis: A phantom study[J]. *Journal of Computer Assisted Tomography*, 2014, 38(6): 824-827.
- [28] KAWAHARA D, OZAWA S, YOKOMACHI K, et al. Accuracy of the raw-data-based effective atomic numbers and monochromatic CT numbers for contrast medium with a dual-energy CT technique[J]. *The British Journal of Radiology*, 2018, 91(1082): 20170524.
- [29] KAWAHARA D, OZAWA S, TANAKA S, et al. Automatic contrast medium extraction system using electron density data with dual-energy CT[J]. *The British Journal of Radiology*, 2018, 91(1090): 20180396.
- [30] MCCOLLOUGH C H, LENG S, YU L, et al. Dual- and multi-energy CT: Principles, technical approaches, and clinical applications[J]. *Radiology*, 2015, 276(3): 637-653.
- [31] 王鹏朝, 单春辉, 郭方凯, 等. 不同双能量组合对 Rho/Z 检测准确性的模体研究[J]. *中国医疗设备*, 2021. DOI:[10.3969/j.issn.1674-1633.2021.09.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-1633.2021.09.016).
WANG P C, SHAN C H, GUO F K, et al. Phantom study on the accuracy of Rho/Z detection with different dual energy combinations[J]. *China Medical Devices*, 2021. DOI:[10.3969/j.issn.1674-1633.2021.09.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-1633.2021.09.016) (in Chinese).
- [32] LANDRY G, RENIERS B, GRANTON P V, et al. Extracting atomic numbers and electron densities from a dual source dual energy CT scanner: Experiments and a simulation model[J]. *Radiotherapy and Oncology*, 2011, 100(3): 375-379.
- [33] LANDRY G, DORRINGER F, SI-MOHAMED S, et al. Technical note: Relative proton stopping power estimation from virtual monoenergetic images reconstructed from dual-layer computed tomography[J]. *Medical*

Physics, 2019, 46(4): 1821–1828.

- [34] YANG M, WOHLFAHRT P, SHEN C, et al. Dual- and multi-energy CT for particle stopping-power estimation: Current state, challenges and potential[J]. Physics in Medicine & Biology, 2023, 68(4). DOI:[10.1088/1361-6560/acabfa](https://doi.org/10.1088/1361-6560/acabfa).

Advances in Measurements of Electron Density and Effective Atomic Number Using Dual-energy Computed Tomography

LU Xinliang, LIU Yunfu, ZHANG Yongxian, LIU Dandan, NIU Yantao[✉]

Department of Radiology, Beijing Tongren Hospital, Capital Medical University, Beijing 100730, China

Abstract: Accurate measurements of electron density and effective atomic number are essential for precise imaging diagnosis and dose estimation in the multiparametric functional analysis of dual-energy computed tomography (CT). This paper provides a review of research progress pertaining to different dual-energy imaging modalities of CT for measuring electron density and effective atomic number accurately. Its aim is to offer a reference for improving the accuracy of imaging diagnosis and treatment planning.

Keywords: dual-energy CT; electron density; effective atomic number; phantom



作者简介: 鲁新亮, 男, 医学硕士, 首都医科大学附属北京同仁医院放射科技师, 主要从事头颈部 CT 质量控制和图像后处理等方面的研究, E-mail: xinliang_lu@163.com; 牛延涛[✉], 男, 医学博士, 首都医科大学附属北京同仁医院放射科主任技师, 主要从事医学影像质量管理和辐射剂量优化等方面的研究, E-mail: ytniul63@163.com。