

能谱 CT 的临床应用与研究进展

黄仁军 综述 李勇刚 审校

【摘要】 MSCT 的应用为疾病的诊断带来了巨大的推动作用,而能谱 CT 利用其单能量图像、基物质图像、能谱曲线、有效原子序数等多种参数进行疾病的诊断和定量分析,极大地丰富了诊断信息。本文主要阐述能谱 CT 的原理、临床应用特点以及发展前景。

【关键词】 能谱 CT; 体层摄影术, X 线计算机; 诊断

【中图分类号】 R814. 42 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2015)01-0081-03

DOI:10. 13609/j. cnki. 1000-0313. 2015. 01. 022

目前,CT 已成为疾病诊断和筛查的一种重要手段,与常规 CT 相比,能谱 CT 利用其单能量图像、基物质图像、能谱曲线、有效原子序数等多种参数进行疾病的诊断及定量分析,不仅为我们提供了传统 CT 具有的人体解剖形态图像,并且利用其多参数成像实现了物质成分分析、鉴别、定量等,大大提高了疾病诊断的准确性和可靠性。

能谱 CT 的基本原理及技术支持

1. 能谱 CT 的基本原理

单能量成像:能谱 CT 几乎在同时、同角度得到高(140 kVp)、低(80 kVp)两种能量 X 线的采样数据,并根据这两种能量数据确定体素在 40~140 keV 能量范围内的衰减系数,同时能谱 CT 可获取范围内其他的 101 个单能量图像。能谱 CT 可通过计算最佳对比噪声比(contrast to noise ratio, CNR)以及相应的能量值而获得最佳单能量图像。与常规 CT 相比,单能量图像具有更好的图像质量、信噪比(signal to noise ratio, SNR)和对比噪声比(CNR)^[1]。

物质组成分析与物质分离:能谱 CT 能将任何物质的 X 线吸收系数转化为任意两种基物质的吸收系数,并达到与该物质相同的 X 线衰减效应,因此可将一种物质的衰减转化为产生同样衰减的两种物质的密度,并根据已知能量水平的某基物质吸收系数就可评价出该基物质的密度及空间分布,从而实现物质组成成分的初步分析及物质分离,并产生物质分离图像^[2,3]。通常选择衰减高低不同的物质组成基物质对,水和碘是常用的组合,因为它包含了从软组织到含碘对比剂以及医学中常见物质的范围^[4]。通过公式 $p = -\ln(I/I_0) = d_1u_1(E) + d_2u_2(E)$ (I_0 :入射强度, I :透射强度, d_1 :物质 1 密度, d_2 :物质 2 密度, u_1 :物质 1 的衰减系数, u_2 :物质 2 的衰减系数, E :相应的能量水平),物质组成分析就能用计算得到的单色光源数据来表示。但是,能谱 CT 物质组成分析并不是确定物质组成,而是通过给定的两种基础物质来产生相同的衰减效应;成分分离时也不是固定以某种物质作为基物质进行物质分离,而是可选择任意两种基物质进行物质分离^[2]。

有效原子序数:如果某元素对 X 线的吸收系数与某化合物或混合物的吸收衰减系数相同,该元素的原子序数就是某化合

物或混合物的有效原子序数。通过计算得出化合物和混合物的有效原子序数,可以用来进行物质检测、鉴别及物质分离等^[5]。物理学家已经确定了两个单能量下 u 值的比值和有效原子序数的对应关系,在临床应用中,人们首先对受检组织进行能谱成像扫描,获取物质随能量变化的 X 线衰减曲线,在曲线上分别得到 70 和 120 keV 两点,计算 u 值,再找出其和有效原子序数曲线的相交点,即可得到其有效原子序数。

2. 能谱图像分析工具

最佳对比噪声比:从能谱成像产生的单能量图像中快速选出最适合图像分析的能量点,应用于单能量图像,从而能够在众多单能量图像中快速并准确找到显示感兴趣组织的最佳能量点。

直方图:直方图可应用于基物质图像、单能量图像或有效原子序数图的分析中,是用来观察不同兴趣区(regio of interest, ROI)中体素分布的最好方法,对区域内的信息进行统计,直方图反应的是统计性质,不包含空间位置信息。直方图的宽窄代表了物质密度、CT 值及有效原子序数的离散程度,高低代表了所占比例的大小。在应用上,直方图也可用来反应物质和组织结构的特性。

散点图:类似于直方图,用于单能量图、基物质图或有效原子序数图的分析。在应用上,与直方图和能谱曲线相近,代表物质和组织结构的特性,可用于鉴别、分类组织结构和疾病,也可用于观察病灶内有无强化。

3. 能谱 CT 的硬、软件支持

瞬时换能高压发生器使单探测器和球管能在 ≤ 0.5 ms 内实现 80~140 kVp 两峰值管电压瞬时切换,视野均为 50 cm。能谱 CT 的探测器选用分子结构稳定的材料,其对 X 线反应速度快,初始速度(X 线转换为可见光的速度)加快 100 倍,清空速度(余晖效应)加快 4 倍,确保两次高速采样之间的数据处理没有影响,同时其采样率增加了 2.5 倍,使得空间分辨力大幅度提高。高频低噪的数据采集系统可保持稳定的球管 X 光焦点大小,高级重建引擎适应性统计迭代(adaptive statistical iterative reconstruction, ASiR)技术、能谱观察与分析系统能够同时观察常规的混合能量 CT 图像(kVp)、单能量 CT 图像(keV)及物质分离的密度图像,能够生成从 40~140 keV 的 101 个单能量图像,物质分离生成新的基物质密度图像,如水,钙,碘等^[4]。

能谱 CT 临床应用进展

1. 低剂量扫描,高质量图像

作者单位:215006 江苏,苏州大学附属第一医院放射科
作者简介:黄仁军(1991—),男,江苏人,硕士研究生,主要从事分子影像学工作。
基金项目:国家自然科学基金项目(81171394),江苏省自然科学基金项目(BK2011307)资助

致密骨质结构、碘对比剂、钙化等常由于射束硬化伪影的产生而影响诊断医师对图像的评价。能谱 CT 单能量图像能够有效地克服硬化伪影,获得与传统 CT 相似或者质量更高的图像。利用能谱 CT 最佳 keV 单能量成像能够明显提高手足肌腱扫描的图像质量,并已用于临床诊断。ASIR 技术的应用更是在提高图像空间分辨力的同时,降低了图像噪声。有研究表明,ASIR 技术在能谱 CT 冠脉造影中的应用使图像噪声降低,空间分辨力更高,在一些细微结构的显示上优于传统 CT^[6]。以上两种技术的应用均有助于降低辐射剂量,增加扫描的安全性。进行 CT 诊断时,金属伪影的产生同样会对诊断医师的准确评估造成不良影响。能谱 CT 通过金属伪影去除系统(metal artifacts reduction system, MARS)技术并结合单能量成像,能够有效地消减假体产生的金属伪影,使假体以及假体周围区域可见性提高^[7]。在行 CT 冠脉检查时,患者有时需要通过口服降心率的药物来减少由于心脏搏动产生的伪影,从而能够准确地评估冠脉改变。有学者在能谱 CT 冠脉造影中应用运动纠正算法,发现在不服用控制心率的药物的情况下,图像质量、可解释性以及准确性均优于传统标准^[8]。心肌灌注扫描时,由于射束硬化伪影的影响,部分有灌注心肌的 CT 值与未灌注区域类似,表现为灌注缺损,能谱 CT 69 keV 的单能量图像不仅可以消除射束硬化伪影的影响,得到准确的 CT 值与心肌灌注图像,并且能够降低图像噪声,得到更高质量的图像^[9]。通过选择合适的参数,腹部 CT 能谱扫描与常规扫描的剂量相当,其单能量图像的噪声低于常规扫描的滤波反射投影(filtered back projection, FBP)重建图像^[10];利用 MARS 技术后,金属植入物附近伪影明显减弱或消除,腹部肿瘤的可见性有所提高,但是在轴面成像中远场效应的伪影更加明显^[11]。能谱最佳单能图像还可很好地增加泌尿道与周围组织的对比度,特别是显示输尿管异位开口方面有很大的优势,对小儿泌尿道畸形的诊断具有重要价值^[12]。最近有研究显示,50Kev 时肠系膜上动脉 CT 成像与常规 CT 相比具有更高的 CNR 以及更好的图像质量^[13]。

2. 在物质成分分离与鉴别中的应用

以往对于斑块成分大多是用 CT 值的不同来进行分析、鉴别,而能谱 CT 提供的能谱曲线、物质分离图像、有效原子序数图等,为斑块成分的分析提供了更加直观、准确、可靠的方法。相关研究认为能谱 CT 根据能谱曲线可有效区分动脉粥样硬化斑块中的纤维成分、脂质成分及血栓样组织,通过测定其出现的范围可判断斑块中脂质成分的相对含量,进而评估斑块的稳定性^[14];比较分析 3 种斑块成分的碘(脂肪)浓度值,发现各成分表现出明显的浓度值差异,即成分的 X 线衰减系数存在明显差异,采用同组基物质进行物质再表达,使成分组间差异得以量化;3 种斑块成分的有效原子序数存在明显差异,将斑块内的 3 种不同物质转换为元素原子序数,可直观显示其不同成分,为鉴别斑块成分提供了新的方法,可早期提示含有易损性脂质成分及血栓样组织的不稳定斑块,可降低脑血管意外的发生率。最近有研究表明,利用能谱 CT 冠脉造影的虚拟平扫技术, SPECT 心肌弥散成像衰减纠正具有一定可行性及可靠性^[15]。肺动脉造影常被认为是诊断肺栓塞的“最佳标准”,但是对较小或较远端的栓子,有时动脉造影同 V/Q 扫描一样也难以发现。能谱 CT 碘基图像可敏感地发现肺灌注差异,且可一站式得到传统肺组织图像、肺动脉 CTA 和肺碘基物质灌注图像,实现形

态学诊断和功能学分析的完美结合,丰富了诊断信息,简化了检查流程^[16],在肺栓塞评价中是十分有用的工具。水基图像的形成可以被用来鉴别增强后的胰腺实质与急性出血,从而发现一些胰腺疾病所致的灌注异常^[17]。能谱 CT 基物质图像还可将骨组织从图像当中移除,得到不显示钙化的图像,使得骨髓被评估成为可能,从而在骨折后骨髓损伤的探测当中得以应用^[5]。在对痛风患者的能谱 CT 扫描中,尿酸基物质图像及尿酸基伪彩图像能够反映高尿酸含量的痛风石的有无、大小、部位、分布情况,并能根据钙基图像上的高钙浓度区分布范围来明确区分痛风石和皮质骨,且可清晰显示骨质破坏边缘的情况^[18]。行 CT 尿路造影时,高密度的对比剂常常会掩盖高密度钙化与结石;而能谱 CT 基物质图像的产生能有效地区分碘剂、钙化和结石^[17,19],使得在传统 CT 中可能被碘剂掩盖的钙化或结石得以准确显示;并且可有效区分结石成分^[5],为尿路结石临床治疗方案的制定提供了很有价值的信息。有研究表明能谱 CT 基物质图像在单纯性与出血性囊肿的鉴别诊断中比传统 CT 更具优势^[19]。

3. 在基物质图像定量分析中的应用

通过能谱 CT 基物质图像,对基物质浓度进行定量分析,可以更准确地了解基物质浓度,并且更敏感地检测出浓度的变化。相关研究表明,常规冠脉 CT 血管造影结合能谱 CT 双能量扫描模式,一次扫描不但可常规分析冠脉血管形态,还可通过物质分离成像及其他能谱定量分析参数提高心肌梗死的检出率,且与 SPECT 及 MRI 心肌灌注的检查结果有较高的一致性^[20]。通过基物质的定量分析,在心肌梗死图像中发现不同增强阶段碘的浓度是不一样的^[21],因此可以通过对不同阶段碘浓度的设定量化范围,对心肌梗死的分期更加精确。通过肺标本能谱 CT 成像,发现在 SiO₂ 基图像上进行肺标本的 SiO₂ 定量可以有效评估肺实质和肺结节内的 SiO₂ 含量,这有可能为诊断和鉴别诊断尘肺病提供一种定量工具,并成为监测接尘工作人员 SiO₂ 暴露量的一种全新工具^[22]。在肝硬化的能谱 CT 应用研究中,通过碘浓度定量分析的差异可以观测肝硬化患者的血流动力学变化,并且能够对肝硬化严重程度进行分级^[23,24],简化了传统肝硬化分级的方式,具有潜在应用价值。

4. 在肿瘤鉴别诊断中的应用

在肿瘤发生的过程中,不仅会有组织结构发生异常改变产生瘤性赘生物,同时还有细胞内组织成分发生变化,多数还会发生血供的改变。传统 CT 对肿瘤的诊断局限于形态学及密度值的变化,而能谱 CT 不仅具有传统 CT 的功能,并且能够应用其能谱曲线、基物质图像定量等对组织成分及血供的异常改变进行多种参数及成像模式的分析,丰富了肿瘤诊断方法,同时也提高了诊断信心。相关研究发现能谱 CT 多参数成像分析在肺部炎性病变与恶性肿瘤的鉴别^[25],肺癌诊断、分型^[26]、鉴别诊断、TNM 临床分期^[27]中具有重要的应用价值;能谱 CT 同样也有助于甲状腺、肝脏、前列腺等器官的良、恶性结节或肿块的鉴别诊断,如 Srinivasan 等^[28]报道能谱 CT 参数提高了颈部恶性病变诊断的敏感度和特异度。Lv 等^[29]研究认为能谱 CT 成像提高了鉴别肝脏微血管瘤和小肝癌的敏感度。此外,能谱 CT 还为肾上腺转移瘤来源的鉴别分析提供了多参数的方法^[30],为转移性肿瘤的诊断与鉴别诊断提供了新的思路。

发展前景

能谱 CT 作为影像医学领域的一项新技术,代表着目前 CT 的发展方向,可为疾病的发现及鉴别提供更多信息。随着多参数成像模式逐渐被熟悉及认可,能谱 CT 在临床上的应用将会越来越广泛,同时,伴随着它的一些争议或者不足也将被修正。未来能谱 CT 有着广阔的应用前景,如更高的时间、空间分辨力,对类风湿性、痛风性关节炎的早期探测、冠脉斑块成分的分析、恶性转移瘤的鉴别等,这将为医学影像学的发展带来强大的推动力,并提供更安全、迅速、准确、可靠的诊断信息。

参考文献:

[1] Patel BN, Thomas JV, Lockhart ME, et al. Single-source dual-energy spectral multidetector CT of pancreatic adenocarcinoma: optimization of energy level viewing significantly increases lesion contrast[J]. *Clini Radiol*, 2013, 68(2): 148-154.

[2] 任庆国, 滑炎卿, 李剑颖. 能谱成像的基本原理及临床应用[J]. *国际医学放射学杂志*, 2011, 34(6): 559-563.

[3] 雷立昌, 陈建宇. 能谱的临床应用与研究进展[J]. *中国医学影像技术*, 2013, 29(1): 146-149.

[4] 李小虎, 刘斌, 余永强, 等. 能谱 CT 的原理与临床应用价值[J]. *中国医疗器械信息*, 2011, 17(10): 1-5.

[5] Fornaro J, Leschka S, Hibbeln D, et al. Dual-and multi-energy CT: approach to functional imaging[J]. *Insights Imaging*, 2011, 2(2): 149-159.

[6] Kazakauskaite E, Husmann L, Stehli J, et al. Image quality in low-dose coronary computed tomography angiography with a new high-definition CT scanner[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2013, 29(2): 471-477.

[7] 沈海敏, 李铭, 刘奕, 等. 应用能谱 CT MARS 技术评价胫骨平台骨折内固定术后疗效[J]. *上海医学影像*, 2012, 21(3): 179-181.

[8] Leipsic J, Labounty TM, Hague CJ, et al. Effect of a novel vendor-specific motion-correction algorithm on image quality and diagnostic accuracy in persons undergoing coronary CT angiography without rate-control medications[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2012, 6(3): 164-171.

[9] Yamada M, Jinzaki M, Kuribayashi S, et al. Beam-Hardening correction for virtual monochromatic imaging of myocardial perfusion via fast-switching dual-kVp 64-slice computed tomography: a pilot study using a human heart specimen[J]. *Circulation J*, 2012, 76(7): 1799-1801.

[10] 林晓珠, 田中功, 福井利佳, 等. 腹部 CT 能谱扫描与常规扫描射线剂量和图像噪声的对比研究[J]. *中华放射学杂志*, 2013, 47(2): 116-120.

[11] Geyera LL, Scherr M, Körner M, et al. Imaging of acute pulmonary embolism using a dual energy CT system with rapid kVp switching: Initial results[J]. *Eur Radiol*, 2012, 81(12): 3711-3718.

[12] 贾爱英. 宝石能谱 CT 在小儿泌尿系畸形诊断中应用价值[J]. *当代医学*, 2013, 19(9): 45-46.

[13] He J, Ma X, Wang Q, et al. Spectral CT demonstration of the superior mesenteric artery: comparison of monochromatic and polychromatic imaging[J]. *Acad Radiol*, 2014, 21(3): 364-368.

[14] 任小璐, 刘云, 王杏娟, 等. 能谱 CT 评估颈动脉粥样硬化非钙化斑块成分[J]. *中国医学影像技术*, 2013, 29(2): 202-205.

[15] Fuchs TA, Sah BR, Stehli J, et al. Attenuation correction maps for SPECT myocardial perfusion imaging from contrast-enhanced coronary CT angiography: gemstone spectral imaging with single-source dual energy and material decomposition[J]. *J Nuclear Med*, 2014, 55(1): 1-4.

[16] 周汝明, 何磊, 张淑倩, 等. 能谱 CT 碘基物质分离技术定量评价肺灌注[J]. *中国医学影像技术*, 2013, 29(2): 289-292.

[17] Silva AC, Morse BG, Hara AK, et al. Dual-Energy (Spectral) CT: applications in abdominal imaging[J]. *Radiographics*, 2011, 31(4): 1031-1046.

[18] 王旭, 李小虎, 刘斌, 等. 双能量能谱 CT 检测痛风石沉积的初步研究[J]. *安徽医科大学学报*, 2013, 48(8): 973-975.

[19] Kaza RK, Platt JF, Megibow AJ. Dual-energy CT of the urinary tract[J]. *Abdom Imaging*, 2013, 38(1): 167-179.

[20] 卜玉莲, 张欢, 潘自来, 等. 能谱 CT 在梗死心肌诊断中的临床应用[J]. *诊断学理论与实践*, 2011, 10(6): 517-522.

[21] Pang LF, Zhang H, Lu W, et al. Spectral CT imaging of myocardial infarction: preliminary animal experience[J]. *Eur Radiol*, 2013, 23(1): 133-138.

[22] 陈步东, 贺文, 李剑颖, 等. 双能能谱 CT 定量检测尘肺 SiO₂[J]. *中国医学影像技术*, 2011, 27(12): 2393-2397.

[23] Lv PJ, Lin XJ, Gao JB, et al. Spectral CT: preliminary studies in the liver cirrhosis[J]. *Korean J Radiol*, 2012, 13(4): 434-442.

[24] Zhao LQ, He W, Yan B, et al. The evaluation of haemodynamics in cirrhotic patients with spectral CT[J]. *Br J Radiol*, 2013, 86(1028): 20130228.

[25] Wang G, Zhang C, Li M, et al. Preliminary application of high-definition computed tomographic gemstone spectral imaging in lung cancer[J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2014, 38(1): 77-81.

[26] 李明英, 王广丽, 崔丁也, 等. 能谱 CT 成像对肺癌分型的初步研究[J]. *山东大学学报(医学版)*, 2012, 50(12): 73-76.

[27] 陈燕, 宋卫东, 王成林. CT 能谱成像对肺部占位性病变鉴别诊断价值的初步研究[J]. *罕少疾病杂志*, 2013, 20(1): 56-59.

[28] Srinivasan A, Parker RA, Manjunathan A, et al. Differentiation of benign and malignant neck pathologies: preliminary experience using spectral computed tomography[J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2013, 37(5): 666-672.

[29] Lv PJ, Lin XZ, Li JY, et al. Differentiation of small hepatic hemangioma from small hepatocellular carcinoma: recently introduced spectral CT method[J]. *Radiology*, 2011, 259(3): 720-729.

[30] 吴春茂, 余永强, 刘斌, 等. CT 能谱成像在鉴别肾上腺皮质腺瘤与肺腺癌肾上腺小转移瘤中的价值[J]. *安徽医科大学学报*, 2013, 48(2): 156-159.

(收稿日期: 2014-02-08 修回日期: 2014-03-24)