

双源 CT 及其临床应用

张龙江 卢光明

近年来多层螺旋 CT 技术的持续进步不仅使冠状动脉的 CT 成像进入了临床实用阶段, 而且在有选择性的患者中有望代替有创性的冠状动脉造影检查。从 4 层 CT 到 64 层 CT 时间分辨率不断提高的同时, 也提高了冠状动脉 CT 的诊断能力。2005 年底推出的双源 CT (dual-source CT, DSCT) 将 CT 的时间分辨率提高到了 83 ms, 这样的时间分辨率已经可以满足临床常规应用的需要, 解决了一些心律失常患者难以进行冠状动脉 CT 成像的问题, 大大拓宽了冠状动脉 CT 的应用范围。同时, 由于 2 个 X 线管在不同的管电压条件下能同时进行螺旋数据采集, 可进行双能量成像, 进行组织成分的定性分析。

一、双源 CT 的基本原理

与单源多层 CT 不同, DSCT 在旋转的机架内安装了 2 个相隔 90° 的 X 线管及 2 套对应的探测器系统。单源多层 CT 利用单节段半扫描重建技术时的时间分辨率等于机架旋转时间的 1/2, 而 DSCT 由于在旋转的机架内安装了 2 套相隔 90° 的图像采集系统, 当两者联合应用时, 机架旋转 90° 即可产生 180° 的投影数据用于图像重建, 因此, 其时间分辨率是旋转时间的 1/4, 即 $330/4 = 82.5 \text{ ms}^{[1-3]}$ 。这样的时间分辨率足以进行不依赖心率的冠状动脉 CT 成像, 也不需要检查前控制心率 (如应用 β -受体阻滞剂), 使得 DSCT 的冠状动脉成像已经满足了进入临床常规应用的必备条件^[4]。DSCT 的 2 套探测器, 每一套由 40 排探测器构成, 其中中央的 32 排准直层厚为 0.6 mm, 两侧各 4 排探测器的准直层厚为 1.2 mm。每一个探测器的纵向覆盖距离为 28.8 mm。通过适当组合单个探测器排数的信号, 可实现 32 层 \times 0.6 mm 或 24 层 \times 1.2 mm 的探测器结构。利用 64 层 CT 的 Z 轴飞焦点技术, 2 个连续的 0.6 mm 准直层厚的 32 层读出数据可被组合为 1 个 64 层的投影, 采样距离在床中心为 0.3 mm。这样, 机架旋转 1 周每一个探测器可采集重叠的 0.6 mm 层厚的 64 层影像。通过应用不同的算法, DSCT 的空间分辨率可高达 0.4 mm \times 0.4 mm \times 0.4 mm。机架的最短旋转时间为 0.33 s, 常用于冠状动脉的数据采集; 还有 0.5 s 和 1.0 s 可供选择。机架内 2 个 X 线管从 2 个发生器内产生高达 80 kV 的最高电压, 并以其独立的电压和电流运行。80、100、120、140 kV 的独立电压条件可采集双能量数据, 即 1 个 X 线管以 80 kV 运行, 而另 1 个则在 140 kV 的独立电压条件下运行。

DSCT 采用独特的技术来降低辐射剂量, 在获得满足诊断的图像质量情况下, 不会导致心脏检查辐射剂量的增加。在同样噪声条件下, 其辐射剂量比单源 CT 可减少 1/2^[5]。

二、DSCT 冠状动脉影像质量的相关研究

随着多层螺旋 CT 技术的不断进步, 其时间分辨率和空间分辨率的不断提高, 明显提高了影像质量。最早利用 4 层 CT (时间分辨率 500 ms) 进行冠状动脉成像的研究中, 大约有 35% 的血管节段不能满足影像评价^[6]。随后的 16 层和 64 层 CT 的时间分辨率提高到 375 ms 和 165 ms, 但仍有 12% 的血管节段不能满足诊断需要。为了减少心脏运动的伪影, 临床需要在进行冠状动脉 CT 成像前常规将心率降低到 65 次/min (bpm) 或以下^[7]。在这样的心率状态下, 可以在心脏相对静止的舒张中期获得满意的影像质量。在已发表的关于 DSCT 影像质量的研究报道中显示, 在不控制心率的情况下, 有 98% 的冠状动脉节段能够满足影像评价^[8-9]。张竹花等^[10]利用 DSCT 在高心率患者 (平均心率 115 bpm) 中的研究也显示, 在不控制心率的情况下, 仍有 94% 的冠状动脉节段的影像质量达到优秀, 这在以往的多层 CT 设备是难以实现的。

冠状动脉的运动速度不一, 其中右冠状动脉的运动速度最快, 回旋支次之, 前降支运动速度最慢^[11]。在心动周期内, 舒张中期冠状动脉的运动速度相对最慢, 收缩中末期和舒张早期的过渡期次之^[11]。以往利用 4、16、64 层以及新近利用 DSCT 的研究^[8]均发现舒张中期 (相当于 R-R 间期的 70% 附近) 是冠状动脉成像的最佳时相。以往利用 4 层及 16 层 CT 的研究还显示, 心率与冠状动脉 CT 的影像质量呈负相关关系, 即随着心率加快, 冠状动脉 CT 的影像质量下降。随着心率加快, 收缩期和舒张期不成比例地缩短, 舒张中期时相明显缩短, 心率在 80 bpm 左右时甚至消失; 相反, 收缩期的持续时间较少受到心率的影响^[12]。这在 DSCT 评价收缩期和舒张期影像质量的研究中得到印证^[12]。当心率 $> 80 \text{ bpm}$ 时, 最佳的重建时相从舒张期移到收缩期^[12]。因此, 在高心率患者, 尽管很难在舒张期获得满意的影像质量, 但在收缩末期可获得较好的影像质量^[10-12]。Matt 等^[9]的研究显示, 心率和 DSCT 冠状动脉影像质量没有相关关系, 在很大范围的心率状态下可以采集足够诊断的冠状动脉 CT 影像, 即使在心率超过 100 bpm 的情况下, 仍然可以在收缩期获得足够诊断的影像质量, 而且无需服用降低心率的药物。以往利用 64 层 CT 的研究发现, 心率变异性要较平均心率更明显地影响冠状动脉的影像质量^[13], 然而 DSCT 的研究没有发现两者之间有明显的相关性^[9]。尽管高心率和心

作者单位: 210002 南京军区南京总医院医学影像科

通信作者: 卢光明, Email: cjr.luguangming@vip.163.com

率变异较大患者的冠状动脉影像能满足诊断需要,但难以在单个最佳重建时相获得所有血管满意的影像,常需要在多个时相分别重组 1 支血管优良的影像,增加了后处理工作的时间。高心率患者是否需要控制心率仍是 DSCT 要探讨的一个问题。

三、冠状动脉血管成像

1. 冠状动脉狭窄或闭塞性病变: DSCT 时间分辨率和空间分辨率已经得到很大提高,其采集的各向同性数据提高了后处理影像的质量和诊断准确性。到目前为止,国外共有 6 份关于 DSCT 诊断冠状动脉狭窄诊断性能的研究报道^[4,14-18],其中有 1 份报道的研究对象是心房纤颤患者^[18],从中可以看出,DSCT 在诊断 >50% 的冠状动脉狭窄性病变时,在血管节段的基础上,诊断敏感性和特异性分别为 80% ~96%、87% ~99%;在患者的基础上,诊断敏感性和特异性分别为 89% ~100%、73% ~100%;无论是在血管节段还是在患者的基础上其均有较高的阴性预测值。郭华等^[19]的研究显示,DSCT 诊断重度冠状动脉狭窄的敏感性、特异性、阳性预测值和阴性预测值分别为 92.3%、99.8%、90.6%、99.3%。尤其值得指出的是,由于时间分辨率的提高,目前利于 DSCT 进行冠状动脉的无创性成像时,心律失常,包括心房纤颤已经不是禁忌证。Oncel 等^[18]的初步研究发现,97% 的血管节段可以满足影像诊断,在这些患者 DSCT 诊断冠状动脉狭窄也具有较高的敏感性和特异性。与 64 层 CT 相比,DSCT 的主要优势在于:(1) 可以进行不依赖心率的冠状动脉血管成像,检查前不需要控制心率,简化了检查程序。(2) 即使对严重钙化的病例,DSCT 仍然具有一定的诊断准确性。以往 64 层 CT 的研究显示,在冠状动脉钙化积分 >400 分的患者,其冠状动脉血管成像的影像质量明显下降,敏感性为 93%,特异性为 67%,阳性预测值和阴性预测值分别为 93% 和 67%^[20];Scheffel 等^[4]的研究则显示,对于冠状动脉钙化积分 >400 分者,DSCT 诊断的敏感性为 96%,特异性为 95%,阳性预测值和阴性预测值为分别 86% 和 99%。但是鉴于目前 DSCT 的空间分辨率(0.4 mm)对于一些小病变以及严重钙化血管腔的显示还不能完全令人满意,严重的冠状动脉钙化依然是严重影响冠状动脉 DSCT 准确性的一个主要因素。患者的呼吸运动伪影有时候也影响对影像质量的评价,重症患者或不能配合屏息的患者则难以获得满意的影像质量,限制了在这些患者中的广泛应用。

2. 冠状动脉支架:由于进行冠状动脉血管成形术并放置支架患者数量的迅速上升,使得无创性评价冠状动脉支架、支架的通畅性及支架内再狭窄成为 CT 冠状动脉成像最有吸引力的方面之一。支架置入后再狭窄率约为 8% ~25%。最近利用 DSCT 进行支架内再狭窄评价的研究结果令人振奋,Pugliese 等^[21]在 100 例患者中发现,DSCT 评价支架内再狭窄(50%)总的敏感性、特异性、阳性预测值和阴性预测值分别为 94%、92%、77%、98%;心率及支架形态对 DSCT 的诊断性能没有明显影响,而支架直径影响 DSCT 对支架内再狭窄的评价,支架直径在 3.5 mm 以上时,诊断敏

感和特异性均高达 100%,而支架直径 <2.75 mm 时,诊断敏感性和特异性分别为 84%、64%,而且不能评价的支架数量全部位于直径 <2.75 mm 的支架内。Ehara 等^[22]利用 64 层 CT 诊断支架内再狭窄总的敏感性、特异性、阳性预测值及阴性预测值分别为 92%、81%、54% 和 98%。相比之下,DSCT 改善了对支架内再狭窄诊断的特异性和阳性预测值。

3. 其他:对急性胸痛患者而言,DSCT 的胸痛三联征检查能够在一次检查期间提供胸主动脉、肺动脉以及冠状动脉优良的影像质量^[23],有助于确定急性胸痛患者的病因,为临床处理提供重要信息。尽管在本文撰写时还没有见到关于 DSCT 其他方面的临床研究报告,但相信 DSCT 有助于提高和改善在以下几个领域的临床应用能力。(1) 与常规冠状动脉造影相比能敏感而可靠地诊断心肌桥。在合适的心率状态下,DSCT 可在心动周期的多个时期重组满意的影像,动态评价心肌桥在心动周期内的变化情况,显示常规冠状动脉造影上的“挤牛奶效应”,有助于评价该段血管被挤压的严重程度。(2) 有助于提高尚未造成管腔狭窄的冠状动脉壁内斑块的显示能力,评价斑块的性质、内部成分及其近段的血管重塑。(3) 评价冠状动脉旁路移植术后桥血管的通畅性,提供高质量的桥血管影像,显示桥血管或吻合口的狭窄或闭塞。(4) 冠状动脉先天性畸形及冠状动脉瘤等病变也可以利用 DSCT 进行准确评价,即使是患有川崎病的儿童,也能利用 DSCT 获得较为满意的影像质量,满足临床诊断的需要。

四、对心功能的评价

利用收缩末期和舒张末期容积、射血分数以及心肌质量等评价心功能在很多心脏疾病中有重要的意义,而目前对这些功能的无创性评价主要是利用超声心动图及 MRI 进行的,其中 MRI 被认为是心肌动态成像和功能评价的金标准^[24-25]。DSCT 高的时间分辨率联合回顾性心电图门控软件的应用不但可实现冠状动脉的无创性评价,其用于冠状动脉 CT 血管成像的数据可直接用于左心室功能的评价,无需增加对比剂和辐射剂量,正逐步成为心脏疾病综合性评价的诊断工具。Brodoefel 等^[23]和 Busch 等^[25]分别利用 DSCT 评价了 20 例和 15 例患者的左心室功能状态,并和电影 MRI 进行了对比,结果发现,DSCT 不仅能准确评价全部功能参数,还有助于定量评价时间依赖性变量(例如最大充盈速度和最大射血速度)和可靠地评价局部室壁运动,在一些情况下可成为与 MRI 相似的“一站式”的影像技术^[25]。

五、DSCT 的临床应用

虽然 DSCT 时间分辨率的提高主要是用于心脏成像,但通过 2 种不同能量(不同 kV)的射线进行同步螺旋扫描,同时获得 2 组螺旋能量数据,可以对不同能量下采集的物质信息进行分析。目前认为通过双能量模式的扫描可自动分离钙质和碘对比剂,用于复杂解剖部位的自动去骨扫描,进行直接的 CT 血管成像;碘对比剂可以从增强影像上去除,实现虚拟平扫;在骨骼肌肉系统实现软骨和韧带的成像;实现

肺通气灌注扫描;鉴别对比增强的结构和实质器官中的高密度物质,例如鉴别肝脏转移瘤和局灶性不含脂肪的肝脏;或者鉴别肾的复杂囊肿和肿瘤组织。Johnson 等^[26]报道了 DSCT 成像在不同器官的初步研究应用,认为双能量 CT 能够特异地对组织进行定性,改善了对血管疾病的评价。Scheffel 等^[27]还评价了双能量虚拟平扫诊断泌尿系结石的价值,结果发现,与标准的平扫 CT 相比,其诊断泌尿系结石具有很好的敏感性和特异性。Primak 等^[28]还发现,利用 DSCT 可鉴别尿酸盐和非尿酸盐结石。目前 DSCT 的临床和实验研究尚无较多的文献报道,仍需要继续进行这方面的研究以探讨其价值所在。

总之,DSCT 时间分辨率和空间分辨率的提高可进行不依赖心率的冠状动脉数据采集,也不需要检查前常规控制心率,简化了检查程序,提高了 CT 检查患者的流通量;其采集的各向同性数据提高了后处理影像的质量和诊断准确性,已可进入常规的临床应用中,开辟了冠状动脉无创性成像的新纪元。DSCT 在两种不同能量状态下的数据采集可实现对物质成分的定性分析,拓宽了 CT 的临床应用范围,正逐步成为 CT 临床应用研究的新前沿技术。

参 考 文 献

- [1] Flohr TG, Schoepf UJ, Ohnesorge BM. Chasing the heart: new developments for cardiac CT. *J Thorac Imaging*, 2007, 22: 4-16.
- [2] Flohr TG, McCollough CH, Bruder H, et al. First performance evaluation of a dual-source CT (DSCT) system. *Eur Radiol*, 2006, 16: 256-268.
- [3] Ohnesorge BM, Flohr TG, Becker CR, et al. Multi-slice and dual-source CT in cardiac imaging: principles, protocols, indications, and outlook. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 2007, 327-358.
- [4] Scheffel H, Alkadhi H, Plass A, et al. Accuracy of dual-source CT coronary angiography: first experience in a high pre-test probability population without heart rate control. *Eur Radiol*, 2006, 16: 2739-2747.
- [5] McCollough CH, Primak AN, Saba O, et al. Dose performance of a 64-channel dual-source CT scanner. *Radiology*, 2007, 243: 775-784.
- [6] Achenbach S, Ropers D, Kuettner A, et al. Contrast-enhanced coronary artery visualization by dual-source computed tomography: initial experience. *Eur J Radiol*, 2006, 57: 331-335.
- [7] Schoepf UJ, Zwerner PL, Savino G, et al. Coronary CT angiography. *Radiology*, 2007, 244: 48-63.
- [8] Leschka S, Scheffel H, Desbiolles L, et al. Image quality and reconstruction intervals of dual-source CT coronary angiography: recommendations for ECG-pulsing windowing. *Invest Radiol*, 2007, 42: 543-549.
- [9] Matt D, Scheffel H, Leschka S, et al. Dual-source CT coronary angiography: image quality, mean heart rate, and heart rate variability. *AJR*, 2007, 189: 567-573.
- [10] 张竹花, 赵文敏, 王林辉, 等. 高心率患者双源 CT 冠状动脉成像初步研究. *实用放射学杂志*, 2007, 23: 1106-1109.
- [11] Husmann L, Leschka S, Desbiolles L, et al. Coronary artery motion and cardiac phases: dependency on heart rate: implications for CT image reconstruction. *Radiology*, 2007, 245: 567-576.
- [12] Seifarth H, Wienbeck S, Püken M, et al. Optimal systolic and diastolic reconstruction windows for coronary CT angiography using dual-source CT. *AJR*, 2007, 189: 1317-1323.
- [13] Leschka S, Wildermuth S, Boehm T, et al. Noninvasive coronary angiography with 64-section CT: effect of average heart rate and heart rate variability on image quality. *Radiology*, 2006, 241: 378-385.
- [14] Leber AW, Johnson T, Becker A, et al. Diagnostic accuracy of dual-source multi-slice CT-coronary angiography in patients with an intermediate pretest likelihood for coronary artery disease. *Eur Heart J*, 2007, 28: 2354-2360.
- [15] Johnson TR, Nikolaou K, Busch S, et al. Diagnostic accuracy of dual-source computed tomography in the diagnosis of coronary artery disease. *Invest Radiol*, 2007, 42: 684-691.
- [16] Weustink AC, Meijboom WB, Mollet NR, et al. Reliable high-speed coronary computed tomography in symptomatic patients. *J Am Coll Cardiol*, 2007, 50: 786-794.
- [17] Heuschmid M, Burgstahler C, Reimann A, et al. Usefulness of noninvasive cardiac imaging using dual-source computed tomography in an unselected population with high prevalence of coronary artery disease. *Am J Cardiol*, 2007, 100: 587-592.
- [18] Oncel D, Oncel G, Tastan A. Effectiveness of dual-source CT coronary angiography for the evaluation of coronary artery disease in patients with atrial fibrillation: initial experience. *Radiology*, 2007, 245: 703-711.
- [19] 郭华, 张龙江, 江时森, 等. 双源 CT 成像在评价冠状动脉狭窄中价值的初步探讨. *医学研究生学报*, 2007, 20: 727-730.
- [20] Raff GL, Gallagher MJ, O'Neill WW, et al. Diagnostic accuracy of noninvasive coronary angiography using 64-slice spiral computed tomography. *J Am Coll Cardiol*, 2005, 46: 552-557.
- [21] Pugliese F, Weustink AC, Van Mieghem C, et al. Dual-source coronary computed tomography angiography for detecting in-stent restenosis. *Heart*, 2007, Sep 19 [Epub ahead of print] .
- [22] Ehara M, Kawai M, Surmely J, et al. Diagnostic accuracy of coronary in-stent restenosis using 64-slice computed tomography comparison with invasive coronary angiography. *J Am Coll Cardiol*, 2007, 49: 951-959.
- [23] Brodoefel H, Kramer U, Reimann A, et al. Dual-source CT with improved temporal resolution in assessment of left ventricular function: a pilot study. *AJR*, 2007, 189: 1064-1070.
- [24] Schertler T, Scheffel H, Franenfelder T, et al. Dual-source computed tomography in patients with acute chest pain: feasibility and image quality. *Eur Radiol*, 2007, 17: 3179-3188.
- [25] Busch S, Johnson TR, Wintersperger BJ, et al. Quantitative assessment of left ventricular function with dual-source CT in comparison to cardiac magnetic resonance imaging: initial findings. *Eur Radiol*, 2007, Oct 2 [Epub ahead of print] .
- [26] Johnson TR, Krauss B, Sedlmair M, et al. Material differentiation by dual energy CT: initial experience. *Eur Radiol*, 2007, 17: 1510-1517.
- [27] Scheffel H, Stolzmann P, Frauenfelder T, et al. Dual-energy contrast-enhanced computed tomography for the detection of urinary stone disease. *Invest Radiol*, 2007, 42: 823-829.
- [28] Primak AN, Fletcher JG, Vrtiska TJ, et al. Noninvasive differentiation of uric acid versus non-uric acid kidney stones using dual-energy CT. *Acad Radiol*, 2007, 14: 1441-1447.

(收稿日期: 2007-12-10)

(本文编辑: 任晓黎)