

基于320排宽探测器CT的冠状动脉CT血管成像 “双低”扫描策略综述

陈静, 龚金山*

内蒙古民族大学, 内蒙古 通辽 028000

DOI:10.61369/MRP.2026050036

摘要 : 冠状动脉CT血管成像(CCTA)目前已成为冠心病无创诊断和筛查的常用手段,但在实际应用中,辐射对人体的影响以及碘对比剂可能带来的肾损伤问题仍需重点关注。320排宽探测器CT(WDCT)借助其16厘米Z轴方向等体素覆盖能力,为从源头降低CCTA检查中的辐射剂量和对比剂使用量提供了技术支持。本文系统梳理了其技术原理、个性化操作、临床验证及问题,重点分析单心动周期采集、前瞻性心电门控容积扫描与低管电压的联合应用,数据显示,通过调整优化扫描方案,有效辐射剂量稳定控制在1 mSv以内,对比剂用量也可减少到30 mL以下,同时不会影响诊断所需的图像质量。未来光子计数技术与宽探测器结构的结合、标准化且个性化方案的确立、基于风险评估的综合模型构建等方向,将在未来推动“双低”CCTA检查朝着更安全、更精准的方向进步。

关键词 : 冠状动脉CT血管成像; 320排CT; 宽探测器CT; 辐射剂量; 对比剂用量; 个性化扫描; 深度学习重建

Coronary CT Angiography Based on 320-Row Wide Detector CT Review of the "Low-Contrast Low-Dose" Scanning Strategy

Chen Jing, Gong Jinshan*

Inner Mongolia Minzu University, Tongliao, Inner Mongolia 028000

Abstract : Coronary CT angiography (CCTA) has become a common non-invasive diagnostic and screening method for coronary heart disease. However, in practical applications, the impact of radiation on the human body and the potential kidney damage caused by iodine contrast agents still require close attention. 320-row wide detector CT (WDCT) utilizes its 16-centimeter Z-axis isotropic coverage capability to provide technical support for reducing the radiation dose and contrast agent usage in CCTA examinations from the source. This article systematically reviews its technical principles, personalized operations, clinical validation, and issues, with a focus on analyzing the combined application of single cardiac cycle acquisition, prospective electrocardiogram gated volume scanning, and low tube voltage. The data shows that by adjusting and optimizing the scanning plan, the effective radiation dose is stably controlled within 1 mSv, and the contrast agent usage can be reduced to below 30 mL, while not affecting the image quality required for diagnosis. In the future, the combination of photon counting technology and wide detector structure, the establishment of standardized and personalized schemes, and the construction of a comprehensive model based on risk assessment will promote the "low-dose" CCTA examination to progress in a safer and more accurate direction.

Keywords : coronary CT angiography; 320-slice CT; wide detector CT; radiation dose; the dosage of contrast agent; personalized scanning; deep learning reconstruction

引言

冠状动脉CT血管成像(CCTA)凭借高阴性预测值与出色空间分辨率,已成为临床评估冠状动脉疾病(CAD)的一线无创影像学方法^[1],但其电离辐射风险与碘对比剂急性肾损伤问题备受关注。

传统多排螺旋CT多采用螺旋扫描结合回顾性心电门控,虽能获得高质量图像,但X线球管持续曝光导致辐射剂量较高,且为维持血管强化效果需使用较多对比剂。320排宽探测器CT的出现,使冠状动脉成像进入容积扫描时代^[2]。为实现“低辐射剂量、低对比剂用量”的“双低”CCTA提供了技术必然性与优越性。本文将从技术原理、临床策略到实践成效等方面,系统阐述320排CT在实现“双低”扫描中的核心价值,探讨其技术基础与关键临床证据,总结个体化实施路径,并对未来发展方向进行展望。

作者简介:陈静(1994.07-),女,蒙古族,就读于内蒙古民族大学,本科学历,研究方向:影像医学与核医学。

一、320排 CT 实现低辐射剂量的核心技术原理与策略

（一）物理基础：宽探测器覆盖与单心动周期采集

320排 CT 的探测器 Z 轴覆盖宽度达 16 厘米，能一次完成整个心脏的扫描，传统螺旋扫描相邻两圈扫过的区域会有重叠，这些重叠的地方却会让患者多受辐射。单心动周期采集技术对于心率稳定且符合条件的患者，整个心脏的数据采集可以在一个心动周期内完成这意味着 X 线的曝光时间特别短，一般只持续 0.27 到 0.35 秒^[9]，对于心率偏高或者心律不齐的患者来说，传统扫描方法可能得多扇区重建或者调整螺距，这样反而会让辐射剂量更高，但 320 排 CT 的单周期采集模式就能避免这种情况带来的辐射飙升问题。

（二）核心扫描模式：前瞻性心电门控容积扫描的绝对主导

宽探测器架构让 320 排 CT 做 CCTA 时，更倾向于用前瞻性心电门控扫描——也就是步进式容积扫描这种方式^[4]。只在心脏运动最平缓的时相触发曝光，从根本上避免了回顾性门控中非诊断时相（约占总剂量 70% 以上）的无效辐射。单期相采集辐射剂量最低，但只适合心率稳定而且比较慢的患者。宽窗采集比如在 R-R 间期 65% 到 75% 这个范围里多次曝光，能给医生留一点选不同阶段图像的空间，应付轻微的心率变化。这种方式剂量比单期相高一点，但还是比回顾性门控低很多。

（三）剂量优化参数的应用—管电压的个性化选择（低 kVp 技术）

降低管电压是减少辐射剂量的有效手段。320 排 CT 因探测器效率高、噪声低，现在很多地方都在用根据患者体型（像身体质量指数，也就是 BMI）调整的个性化方案。BMI < 25 kg/m²：首选 70–80kVp。BMI 25–30kg/m²：可选择 80–100kVp。对于 BMI 超过 30kg/m² 的情况，要仔细评估后再确定扫描参数，一般会选择 100 到 120kVp 的范围，这样能保证拍出来的图像清晰可用。低 kVp 还能增强碘对比剂的衰减，为减少对比剂用量创造条件^[5]。

（四）辐射剂量降低的临床证据总结

临床研究证实，通过优化扫描方案，320 排 CT 可将 CCTA 有效辐射剂量从常规的 5–15mSv 降至亚毫西弗至 1mSv 范围，剂量降幅超过 90%，图像质量也不会受太大影响。最新研究还指出，用 70 kVp 电压配合深度学习重建技术，不仅能减少辐射剂量，还能让图像更清晰、医生诊断时更有把握^[6]。

二、320排 CT 实现低对比剂用量的技术原理与实施路径

降低对比剂用量不能影响血管腔强化效果，也得保证管腔边界清晰。宽探测器本身不会直接提升时间分辨率，但 320 排 CT 常采用半扫描重建技术，再配合单扇区重建算法，最终能达到 175 毫秒的高时间分辨率，有效减少心脏运动伪影，即便冠状动脉强化峰值不算高，也能得到边界清晰的血管图像。宽探测器一次就能完成整个心脏的采集，不用像多圈螺旋扫描那样累积层间噪声，

也不会出现缝合伪影，从物理层面降低了图像的背景噪声，提高噪声比（CNR）。这为减少对比剂用量、降低血管腔内绝对强化值后仍能维持足够 CNR 提供了技术上的缓冲空间^[7]。

（一）低对比剂方案的生理学基础

减少对比剂用量是降低肾脏损伤风险的重要办法。不过要是只单纯减少用量，可能会让血管里对比剂浓度达不到要求的峰值。理想状态下，心脏 CT 血管成像需要在整个扫描过程中，让冠状动脉里的对比剂浓度保持稳定且足够高——通常要超过 350HU 才行。这时候就需要搭配其他方法来弥补，比如把 CT 扫描的管电压调低——这样能让碘在图像上显示得更清楚；或者调整对比剂的推注速度。

还要考虑患者自身情况的影响。像那些心脏泵血多的患者，比如得了主动脉瓣关闭不全的人，对比剂会被血液快速稀释，这时候可能就得把推注速度调快一点，或者适当增加用量否则将影响图像质量。

（二）“双低”扫描中的协同策略：低 kVp 的核心纽带作用

低管电压技术是实现“双低”策略的核心，它在降低辐射剂量的同时，为减少对比剂用量创造条件，尤其适用于需要多次扫描的患者群体。

当管电压接近碘 K 缘（33.2 keV）时，光电效应变成主要方式，碘吸收明显上升。研究表明，管电压从 120kVp 降至 80kVp，碘 CT 值可提升 70%—100%^[5]。这意味着 80kVp 下达到 350HU 强化目标的时候，所需的碘浓度仅为 120kVp 的一半，为临床大幅减少碘总量提供了直接理论支撑

（三）“双低”捆绑设计方案

基于低 kVp 放大效应，可设计一体化“双低”方案：

患者选择：适用于 BMI 正常或偏低者（采用 70–80kVp）。

对比剂方案：用量调整至 20—30 毫升（传统方案 60—80 毫升），新研究指出联合 CE-Boost 与深度学习重建可减少用量近七成，约 67.8%，而且得到的图像质量没什么差别。临床常选用高浓度对比剂（370—400mgI/ml），注射流速 3.5—4.0ml/s。

扫描参数：采用前瞻性门控单期相采集，管电压 70—80kVp，管电流按自动曝光控制调整。

图像重建：需借助高级迭代重建或深度学习算法处理低剂量高噪声问题，在保留细节的同时抑制噪声。比如在肺部 CT 扫描中，低剂量采集时产生的颗粒状噪声会影响病灶识别，而通过上述重建技术能让图像更清晰，帮助医生更准确地判断病情^[8,9]。

（四）低对比剂方案的临床验证

多项研究证实 320 排 CT 低对比剂方案可行。一项随机对照研究显示，0.5ml/kg 组平均用量仅 34.65 ± 5.38 毫升^[6]。图像质量与高剂量组无显著差异。光子计数 CT 研究将用量降至中位数 28.0 毫升。“三低”CCTA 方案（100kVp、0.3ml/kg、2ml/s）联合 CE-Boost 与深度学习重建，对比剂用量减少 67.8%，辐射剂量减少 52.0%，CNR 与常规方案相当。对于 BMI 25—30kg/m² 患者，采用 100kVp 联合 35—40 毫升对比剂同样安全有效。这些研究证实，合理选择患者后，对比剂用量可减半甚至降至 30 毫升以下。

三、当前挑战与未来展望

(一) 当前面临的主要挑战

对于BMI超过35kg/m²的极度肥胖患者，低kVp（如80kVp）会导致光子数量严重不足、图像噪声过高而难以诊断，通常只能选择120kVp并采用常规或更高对比剂剂量，“双低”目标难以实现。极低剂量和低对比剂用量可能影响基于CT值的定量分析，如冠状动脉钙化积分（CACs）的准确性会因低kVp发生改变，非钙化斑块成分定量分析的稳定性也有待更多研究确认。目前不同医疗中心的“双低”方案差异较大，缺乏基于大规模多中心前瞻性研究的权威共识指南，限制了技术的最优化推广。

(二) 未来发展方向与展望

光子计数CT（PCCT）与宽探测器结合是最具变革性的方向。PCCT具备高剂量效率、无电子噪声、多能量成像等优势。若与宽探测器容积扫描结合，可进一步降低辐射剂量和对比剂用量，消除钙化伪影，提升斑块分析精度，甚至实现无对比剂冠脉成像。深度学习重建（DLIR）已在“双低”CCTA中展现优势^[9,10]。未来融合去噪与分割功能的模型有望在抑制噪声的同时增强细微结构显示。未来CCTA方案制定需整合患者辐射风险、肾毒性风险及冠心病患病风险，构建决策支持模型，实现“个体最优化”而非单纯“参数最低化”扫描。此外，还需开展长期随访研究，证实“双低”CCTA在降低远期癌症风险、减少肾功能损

害方面的临床获益及卫生经济学价值。

四、结论

320排宽探测器CT在物理设计上进行了根本性革新，为冠状动脉CTA实现“双低”——也就是低辐射剂量加上低对比剂用量扫描——提供了目前最有效、最稳定的技术平台^[9]。它具备单心动周期容积采集能力，再结合前瞻性心电图门控模式，从根本上让辐射剂量实现了数量级的降低。

低管电压技术是其中关键环节，它和高级迭代重建算法、深度学习重建相互配合，在大幅减少对对比剂用量时，依然能保证诊断所需的优质图像质量^[10]。

现有不少高水平临床证据显示，对大部分患者来说，用320排CT制定系统化优化方案，能把CCTA有效辐射剂量常规控制在1mSv以下，碘对比剂用量也能减到30mL甚至更低^[11]，打破了安全性和图像质量之间的传统权衡关系。

不过在极度肥胖患者中的应用、对定量分析产生的影响以及协议标准化这些方面，还需要进一步研究。未来光子计数CT技术和宽探测器架构结合起来，可能会带来下一次成像模式的变革^[12]。持续推进技术创新、开展严谨临床研究、规范实践推广后，基于320排CT的“双低”CCTA会朝着更安全、精准、个性化方向发展，让更多患者从这项优秀无创影像技术中得到好处。

参考文献

- [1] Sabarudin A, Sun Z, Ng K-H. Coronary computed tomography angiography with prospective electrocardiography triggering: a systematic review of image quality and radiation dose [J]. Singapore Medical Journal, 54(1):15-23, 2013.
- [2] Pan Y, Jia C-F. The research advancements on the advantages and limitations of coronary computed tomography angiography at low tube voltage: a literature review [J]. Quantitative Imaging in Medicine and Surgery, 15(6):5859-5867, 2025.
- [3] Fan Y, Qin T, Sun Q, et al. A review of factors affecting radiation dose and image quality in coronary CTA performed with wide-detector CT [J]. Tomography, 10(11):1730-1743, 2024.
- [4] Huang L, Zhao F, Zhong Z, et al. Optimizing coronary computed tomography angiography image quality with motion-compensated reconstruction: a prospective electrocardiogram-triggered mode with second-generation dual-layer spectral detector computed tomography [J]. Journal of Thoracic Disease, 17(10):8196-8209, 2025.
- [5] Vargas E E, Tetteroo P M, Kristiansen C H, et al. Optimizing coronary CT angiography with spectral dual-layer CT: motion-compensated virtual monoenergetic imaging achieves 50% contrast dose reduction in a phantom study [J]. International Journal of Cardiovascular Imaging, 2025.
- [6] Yuan D, Wang L, Lyu P, et al. Evaluation of image quality on low contrast media with deep learning image reconstruction algorithm in prospective ECG-triggering coronary CT angiography [J]. International Journal of Cardiovascular Imaging, 40(6):1377-1388, 2024.
- [7] Wang Z, Chen G, Song D, et al. Reduced contrast agent volume using a heart-rate dependent and free-breathing scanning protocol in coronary computed tomography angiography (CTA) for patients with chronic obstructive pulmonary disease (COPD) [J]. BMC Cardiovascular Disorders, 25(1), 2025.
- [8] Zou L-M, Xu C, Xu M, et al. Improved image quality and diagnostic performance of coronary computed tomography angiography-derived fractional flow reserve with super-resolution deep learning reconstruction [J]. Quantitative Imaging in Medicine and Surgery, 15(9), 2025.
- [9] Zhang Q, Sheng A Z, Ren H, et al. Tripartite strategy for dual reduction of radiation and iodine dose in obese CCTA: high-iodine contrast, 80 kVp, and deep learning reconstruction [J]. Medicine, 104(44), 2025.
- [10] Ronning M, Johansen E, Rusandu A. Photon-counting CT versus energy-integrating detectors for cardiac imaging: a systematic review of evidence from in vivo human studies on image quality and radiation dose [J]. BMC Medical Imaging, 25(1), 2025.
- [11] Xu C, Sun Y, Wang L, et al. Spectral photon-counting detector coronary CTA with reduced radiation and contrast medium dose in inflammation-associated coronary artery disease: A prospective study [J]. American Journal of Roentgenology, 225(6), 2025.
- [12] Tremamunno G, Pinos D, Zsarnoczay E, et al. Influence of virtual monoenergetic reconstructions on coronary CT angiography-based fractional flow reserve with photon-counting detector CT: intra-individual comparison with energy-integrating detector CT [J]. Insights into Imaging, 16(1), 2025.