

综述

全迭代重建技术在心脏冠状动脉CTA中的应用现状

江苏省南京医科大学附属苏州医院
放射科 (江苏 苏州 215002)

钱伟亮 许建铭

【关键词】心脏; 冠状动脉

【中图分类号】R445.3; R541.4

【文献标识码】A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-5131.2020.02.044

通讯作者: 许建铭

心脏冠状动脉血管成像(coronary CT angiography, CCTA)由于其高敏感度和阴性预测值是目前无创诊断冠状动脉疾病的重要手段^[1],但其潜在的辐射剂量和对比剂用量危害一直是人们关注的焦点。迭代重建(iterative reconstruction, IR)技术可以提高图像质量、降低辐射剂量^[2],国内最新指南^[3]亦推荐使用IR进行图像重建。由于计算能力的提升以及设备硬件、软件的发展,IR技术发展迅速,其中全迭代重建技术是最新形式,在降低CTA辐射剂量上比以往IR技术更有潜力^[4],在减少对比剂用量^[5]、提高诊断准确性^[6]和血管斑块分析^[7]等方面也有很大价值。本文就全迭代重建技术在CCTA的应用现状进行综述。

1 全迭代重建技术的原理

全迭代重建技术是对X射线束从焦点到探测器的整个光学采集过程建立多个模型,不仅考虑了噪声模型,还包括解剖模型、几何模型和系统模型等平台,在重建过程中确立数据统计模型以及图像统计模型,考虑到了焦点尺寸、X线束宽度、体素大小、探测器像素尺寸和光束和探测器之间的相互作用等因素,并且通过不断迭代来减少扫描模型与采集数据之间的差异,最终更真实准确的还原扫描信息,获取最优化的图像。有别于既往的IR技术,它是纯模型迭代,不包含FBP成分,获取的空间分辨率与对象的对比度和噪声水平是非线性变化的^[8-9]。目前在临床上应用的主要包括GE的基于模型的迭代重建(model-based iterative reconstruction, MBIR)即VEO技术、Philips的全模型迭代重建(iterative model reconstruction, IMR)和Toshiba的基于正投影模型的迭代重建法(forward projected model-based iterative reconstruction solution, FIRST)。

2 全迭代重建技术在CCTA中的应用

2.1 降低辐射剂量 降低CCTA辐射剂量的主要手段包括:降低管电流、降低管电压、大螺距扫描、前瞻性心电门控的使用以及IR技术的应用。目前降低CCTA辐射剂量的方式除了调整扫描条件外,更多的是结合IR的使用^[10]。有学者^[11-12]在动物模型中分别采用低管电压和低管电流联合IMR重建的方法评估低剂量CCTA的可行性,认为利用80kV或最低70%的管电流成像条件,IMR可提高实验猪模型冠状动脉图像质量并且满足诊断要求。Yuki H等^[13]利用100kV联合IMR行成人CCTA成像,对比冠状动脉的三个主要分支,相较FBP和iDose⁴,除了血管内CT值无差异外,IMR图像的噪声明显下降、CNR明显升高,初步证实了全迭代重建在低剂量成人CCTA中的可行性。Park CH等^[14]进一步降低管电压至80kV并联合前瞻性心电门控行CCTA成像,发现IMR的图像质量仍优于FBP和iDose⁴,其辐射剂量仅为0.89mSv。蒋耀军等^[15]利用前瞻性心电门控联合低管电压扫描条件,将BMI \geq 25kg/m²的患者管电压设置为100kV,其余设为80kV,发现IMR的图像更能降低噪声、伪影,提高血管内CT值、SNR和CNR,相较于指南^[3]推荐的管电压进一步降低,也说明了利用全迭代重建的低管电压成像适用范围更广。究其原因,主要是由于80kV的X射线光子能量靠近的碘的吸收峰,利于血管成像,而全迭代重建技术的强去噪性能可以避免因降低扫描条件后产生高噪声的

缺点,最终能确保良好的图像质量^[5]。Fuchs TA等^[16]对管电流、管电压进行大幅度调控后行CCTA扫描,利用MBIR重建获得的辐射剂量最低仅为0.21mSv,相当于一张胸片的剂量,进一步证实了全迭代重建应用在低剂量CCTA上的潜力。

2.2 降低对比剂量 降低对比剂量主要包括降低对比剂的用量和浓度,最终目的都是为了减少碘的摄入量,减少对对比剂肾病的发生。Zhang F等^[5]采用80kV联合IMR行CCTA时,将对比剂用量从70ml降低到35ml,对比剂速从(4.5-5.5)ml/s降低到(3.5-4.5)ml/s,发现低剂量组CCTA图像在血管内CT值、SNR和CNR都优于常规组(100kV联合iDose⁴),在显示冠脉远端分支时甚至更有优势,而该方案能降低52.4%的碘摄入量((1.0±0.5)gI/s、(2.1±0.5)gI/s)和56.4%的辐射剂量((2.4±1.2)mSv、(5.5±1.4)mSv)。而Iyama Y等^[17]将对比剂浓度从370mgI/kg降至222mgI/kg,同时缩短注射速率(15s降至12s),通过调整对比剂浓度及速率来减少碘摄入量(18.5mgI/kg/s、24.7mgI/kg/s),同时降低管电压(120kV降至80kV),评估不同重建技术行“双低”CCTA的可行性,发现IMR图像在主观和客观评价方面都有优势,而新方案可以减少40%对比剂剂量((35.7±8.4)ml、(59.7±9.0)ml)和74%辐射剂量((1.4±0.1)mSv、(5.4±0.5)mSv)。降低对比度用量、浓度和注射速率可能导致血管内增强不足而影响诊断,而利用低管电压联合全迭代重建却依旧能保持良好的图像质量,一方面低管电压可以减少辐射剂量,且其平均光子能量更接近碘的K峰边缘33keV,会导致高碘对比剂增强,有利于血管成像,另一方面由于低管电压穿透力下降会导致图像

噪声升高,不利于产生良好的图像质量,使得低管电压并不常规适用于临床。而全迭代重建在降低图像噪声方面优势显著,正好能弥补低管电压的劣势,因此两者的联合使用是目前双低CCTA的热点研究和发展趋势。

2.3 病变评估

2.3.1 图像质量: 相比FBP和HIR,全迭代重建能降低图像噪声、减少硬化束伪影、提高血管锐利度、提高诊断信心,也能提高血管内CT值、SNR和CNR,在冠状动脉远端分支显影方面也有优势^[5-6,11-15,17],也能更好的识别解剖结构^[18-19]。然而,也有学者在胸部^[20]、腹部^[21]研究中提到全迭代重建由于去噪能力过强而导致图像过度平滑,可能会丢失部分解剖学细节,这也是指南^[3]不推荐迭代重建过高权重设置的原因。通过重建条件的合理选择、优化设置可能会使降噪和失真达到平衡,减少对整体图像质量的影响^[22-23]。

2.3.2 狭窄程度: Benz DC等^[6]以数字减影血管造影(digital subtraction angiography, DSA)为标准,评估MBIR和不同权重HIR对于CCTA诊断冠状动脉狭窄的影响,认为MBIR的诊断特异度和准确度均高于HIR,而诊断敏感度无差异,推测可能是由于MBIR的低噪声和高SNR所导致。Stehli J等^[24]进一步以低管电压联合MBIR行CCTA扫描并对照DSA,在取得的辐射剂量仅为(0.29±0.12)mSv时发现其诊断患者血管狭窄程度大于50%时的敏感度、特异度、阳性预测值、阴性预测值和准确度分别为100%,74%,77%,100%和86%。目前基于全迭代重建CCTA的研究主要在集中在降低辐射剂量、提高图像质量等可行性方面,仍需要更多的研究来评估与DSA的一致性。

2.3.3 斑块分析: 除了对于

管腔狭窄程度的判断,斑块分析也是人们关注的焦点。Scheffel H等^[25]发现MBIR比FBP和HIR能更好的显示冠状动脉粥样硬化斑块, Funama Y等^[26]进一步分析不同重建方式对斑块测量的影响,认为FIRST能增加斑块的密度和对比度,从而提高斑块的可视化程度。而Precht H等^[27]认为VEO测量的斑块体积和负荷均呈减小趋势,但密度没变化, Karolyi M等^[28]也同样认为IMR测量的斑块体积小于FBP和HIR。Puchner SB等^[29]利用斑块自动分析软件对FBP、HIR和MBIR图像分析,发现MBIR图像需要人工手动修正血管内外壁边界的比例显著低于前两者,特别是在钙化的部位,并且MBIR图像所需的分析时间最短,其团队又以血管内超声测量斑块为标准,利用自动化软件分别对FBP、ASIR和MBIR图像分析,发现MBIR图像的符合率更高^[7],又从组织学上证实MBIR在检出脂质体斑块的优势^[30]。这些研究展示了全迭代重建图像在斑块评估方面的潜力,为自动化评估血管斑块提供了潜在的临床可行性。

2.3.4 诊断价值: 由于降低图像噪声,减少图像伪影,全迭代重建技术能提高人工心脏瓣膜^[31]、冠状动脉支架置入后^[32]的图像质量,并对于支架内再狭窄的诊断也更准确^[33]。Tanabe Y等^[34]对比碘剂延迟增强CT与钆剂延迟增强MRI,发现IMR比FBP和HIR允许更精确的心肌梗死程度评价。目前全迭代重建的研究主要集中在扫描可行性方面,对于其可能为CCTA带来更好的临床诊断价值仍需要更多的研究来证实。

2.4 特殊人群 婴幼儿对于辐射的敏感是成人的10倍,运用IR来降低患儿CT检查中的辐射剂量也是重要的方法之一。在婴幼儿先天性心脏病CTA评估时,不同研究者^[18,35]利用低管电压联合

全迭代重建时均能将有效辐射剂量控制在1mSv以下,最低仅为0.16mSv^[18],全迭代重建能提高图像质量,更好的识别解剖结构,其诊断价值并没有下降。

体重 ≥ 90 kg的患者指南^[3]推荐使用120kV扫描,因为过高体重患者在采用低管电压扫描时由于图像噪声大而可能影响诊断,全迭代算法可以有效地抑制噪声。McLaughlin PD等^[36]认为不论患者身体质量指数(body mass index, BMI)高低,MBIR在盆腹部都具有降低辐射剂量的能力,只是对高BMI患者的去噪声能力可能稍逊于低BMI患者。Fuchs TA等^[23]在BMI ≥ 40 kg/m²的患者中对比低剂量组(100kV、210mAs、MBIR)和常规剂量组(120kV、700mAs、HIR)的CCTA图像,认为前者的图像质量仍要优于后者,说明MBIR在对高体重患者行CCTA检查时应用范围广泛。目前全迭代重建大部分都在标准BMI患者中应用,日后仍需要在高BMI患者中进一步研究。

3 问题与展望

全迭代重建的应用目前仍存在一些问题。第一,早期的MBIR重建时间过长是制约其在临床上推广的主要因素,最新IMR的重建时间大幅降低,缩短至5min,虽然仍慢于FBP,但基本能满足临床应用,而在急诊方面的价值有待于进一步研究。第二,全迭代重建消除噪声后产生的图像由于太过平滑而显示的不太自然,被称为蜡像伪影,这与其他重建图像差异明显,研究中的主观分析方面很难做到双盲,总之如何减少阅片者的主观评判偏倚将是一个挑战。第三、目前大部分基于全迭代重建的CCTA研究都只是评估图像质量,初步探讨其临床应用的可行性,仍需要更多的研究来评估与金标准DSA的符合率,以全

面探讨该类算法的临床价值。

全迭代重建图像的客观图像参数良好,对斑块的可视化程度较好,在未来人工智能斑块分析方面可能会有一定价值,因为其相对不需要依赖阅片者的经验。全迭代重建应用基于一定的硬件设施及强大的计算能力,目前并没有在临床上广泛应用,因此需要更多的研究结果来评估其临床价值。

总之,在CCTA方面,与FBP、部分迭代重建相比,全迭代重建能更好的降低噪声、减少伪影、提高图像质量,在狭窄评估、斑块分析和疾病诊断方面也具有一定价值,特别是在“双低”成像扫描中潜力巨大。

参考文献

- [1] 尹所,汪春红. 冠状动脉双源CT增强及造影在冠脉粥样硬化性狭窄诊断中的对比研究[J]. 中国CT和MRI杂志, 2015, 13(1): 8-10.
- [2] Den Harder AM, Willeminck MJ, De Ruiter QM, et al. Dose reduction with iterative reconstruction for coronary CT angiography: a systematic review and meta-analysis[J]. Br J Radiol, 2016, 89(1058): 20150068.
- [3] 中华医学会放射学分会心胸学组,《中华放射学杂志》心脏冠状动脉多排CT临床应用指南写作专家组. 心脏冠状动脉CT血管成像技术规范应用中国指南[J]. 中华放射学杂志, 2017, 51(10): 732-743.
- [4] 丰川,钱伟亮,周丹静,等. 极低辐射剂量扫描结合模型迭代重建技术在下肢CTA中应用研究[J]. 中国CT和MRI杂志, 2018, 16(3): 117-120.
- [5] Zhang F, Yang L, Song X, et al. Feasibility study of low tube voltage (80 kVp) coronary CT angiography combined with contrast medium reduction using iterative model reconstruction (IMR) on standard BMI patients[J]. Br J Radiol, 2016, 89(1058): 20150766.
- [6] Benz DC, Fuchs TA, Grani C, et al. Head-to-head comparison of adaptive statistical and model-based iterative reconstruction

algorithms for submillisievert coronary CT angiography[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2018, 19(2): 193-198.

- [7] Puchner SB, Ferencik M, Maehara A, et al. Iterative Image Reconstruction Improves the Accuracy of Automated Plaque Burden Assessment in Coronary CT Angiography: A Comparison With Intravascular Ultrasound[J]. AJR Am J Roentgenol, 2017, 208(4): 777-784.
- [8] Oda S, Weissman G, Vembar M, et al. Iterative model reconstruction: improved image quality of low-tube-voltage prospective ECG-gated coronary CT angiography images at 256-slice CT[J]. Eur J Radiol, 2014, 83(8): 1408-1415.
- [9] Chang W, Lee JM, Lee K, et al. Assessment of a model-based, iterative reconstruction algorithm (MBIR) regarding image quality and dose reduction in liver computed tomography[J]. Invest Radiol, 2013, 48(8): 598-606.
- [10] Naoum C, Blanke P, Leipsic J. Iterative reconstruction in cardiac CT[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2015, 9(4): 255-263.
- [11] Hu MQ, Li M, Liu ZY, et al. Image quality evaluation of iterative model reconstruction on low tube voltage (80 kVp) coronary CT angiography in an animal study[J]. Acta Radiol, 2016, 57(2): 170-177.
- [12] 蒋骏,黄美萍,雷益,等. 全模型迭代重建技术在心脏CT成像中应用的实验研究[J]. 中华放射学杂志, 2015, 49(6): 473-477.
- [13] Yuki H, Utsunomiya D, Funama Y, et al. Value of knowledge-based iterative model reconstruction in low-kV 256-slice coronary CT angiography[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2014, 8(2): 115-123.
- [14] Park CH, Lee J, Oh C, et al. The feasibility of submillisievert coronary CT angiography with low tube voltage, prospective ECG gating, and a knowledge-based iterative model reconstruction algorithm[J]. Int J Cardiovasc

- Imaging, 2015, 31 (Suppl 2): 197-203.
- [15] 蒋耀军, 高剑波, 刘杰, 等. 低管电压迭代重建模型在冠状动脉CTA中的应用[J]. 中国医学影像技术, 2016, 32 (11): 1753-1756.
- [16] Fuchs TA, Stehli J, Bull S, et al. Coronary computed tomography angiography with model-based iterative reconstruction using a radiation exposure similar to chest X-ray examination[J]. Eur Heart J, 2014, 35 (17): 1131-1136.
- [17] Iyama Y, Nakaura T, Yokoyama K, et al. Low-Contrast and Low-Radiation Dose Protocol in Cardiac Computed Tomography: Usefulness of Low Tube Voltage and Knowledge-Based Iterative Model Reconstruction Algorithm[J]. J Comput Assist Tomogr, 2016, 40 (6): 941-947.
- [18] Shirota G, Maeda E, Namiki Y, et al. Pediatric 320-row cardiac computed tomography using electrocardiogram-gated model-based full iterative reconstruction[J]. Pediatr Radiol, 2017, 47 (11): 1463-1470.
- [19] Oda S, Weissman G, Vembar M, et al. Cardiac CT for planning redo cardiac surgery: effect of knowledge-based iterative model reconstruction on image quality[J]. Eur Radiol, 2015, 25 (1): 58-64.
- [20] Katsura M, Matsuda I, Akahane M, et al. Model-based iterative reconstruction technique for radiation dose reduction in chest CT: comparison with the adaptive statistical iterative reconstruction technique[J]. Eur Radiol, 2012, 22 (8): 1613-1623.
- [21] Lin XZ, Machida H, Tanaka I, et al. CT of the pancreas: comparison of image quality and pancreatic duct depiction among model-based iterative, adaptive statistical iterative, and filtered back projection reconstruction techniques[J]. Abdom Imaging, 2014, 39 (3): 497-505.
- [22] 樊荣荣, 施晓雷, 张天然, 等. 迭代模型重建技术参数设置对肝脏低剂量增强CT扫描图像质量的影响[J]. 中国医学影像技术, 2017, 33 (11): 1711-1715.
- [23] Jensen CT, Telesmanich ME, Wagner-Bartak NA, et al. Evaluation of Abdominal Computed Tomography Image Quality Using a New Version of Vendor-Specific Model-Based Iterative Reconstruction[J]. J Comput Assist Tomogr, 2017, 41 (1): 67-74.
- [24] Stehli J, Fuchs TA, Bull S, et al. Accuracy of coronary CT angiography using a submillisievert fraction of radiation exposure: comparison with invasive coronary angiography[J]. J Am Coll Cardiol, 2017, 64 (8): 772-780.
- [25] Scheffel H, Stolzmann P, Schlett CL, et al. Coronary artery plaques: cardiac CT with model-based and adaptive-statistical iterative reconstruction technique[J]. Eur J Radiol, 2012, 81 (3): e363-369.
- [26] Funama Y, Utsunomiya D, Hirata K, et al. Improved Estimation of Coronary Plaque and Luminal Attenuation Using a Vendor-specific Model-based Iterative Reconstruction Algorithm in Contrast-enhanced CT Coronary Angiography[J]. Acad Radiol, 2017, 24 (9): 1070-1078.
- [27] Precht H, Kitslaar PH, Broersen A, et al. First experiences with model based iterative reconstructions influence on quantitative plaque volume and intensity measurements in coronary computed tomography angiography[J]. Radiography (Lond), 2017, 23 (1): 77-79.
- [28] Karolyi M, Szilveszter B, Kolossvary M, et al. Iterative model reconstruction reduces calcified plaque volume in coronary CT angiography[J]. Eur J Radiol, 2017, 87: 83-89.
- [29] Puchner SB, Ferencik M, Karolyi M, et al. The effect of iterative image reconstruction algorithms on the feasibility of automated plaque assessment in coronary CT angiography[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2013, 29 (8): 1879-1888.
- [30] Puchner SB, Ferencik M, Maurovich-Horvat P, et al. Iterative image reconstruction algorithms in coronary CT angiography improve the detection of lipid-core plaque--a comparison with histology[J]. Eur Radiol, 2015, 25 (1): 15-23.
- [31] Sucha D, Willemink MJ, De Jong PA, et al. The impact of a new model-based iterative reconstruction algorithm on prosthetic heart valve related artifacts at reduced radiation dose MDCT[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2014, 30 (4): 785-793.
- [32] Tatsugami F, Higaki T, Sakane H, et al. Coronary Artery Stent Evaluation with Model-based Iterative Reconstruction at Coronary CT Angiography[J]. Acad Radiol, 2017, 24 (8): 975-981.
- [33] Tatsugami F, Higaki T, Sakane H, et al. Diagnostic accuracy of in-stent restenosis using model-based iterative reconstruction at coronary CT angiography: initial experience[J]. Br J Radiol, 2018, 91 (1082): 20170598.
- [34] Tanabe Y, Kido T, Kurata A, et al. Impact of knowledge-based iterative model reconstruction on myocardial late iodine enhancement in computed tomography and comparison with cardiac magnetic resonance[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2017, 33 (10): 1609-1618.
- [35] Kligerman S, Bolster F, Mitchell J, et al. Use of Model-based Iterative Reconstruction to Improve Detection of Congenital Cardiovascular Anomalies in Infants Undergoing Free-breathing Computed Tomographic Angiography[J]. J Thorac Imaging, 2017, 32 (2): 127-135.
- [36] McLaughlin PD, Murphy KP, Twomey M, et al. Pure Iterative Reconstruction Improves Image Quality in Computed Tomography of the Abdomen and Pelvis Acquired at Substantially Reduced Radiation Doses in Patients With Active Crohn Disease[J]. J Comput Assist Tomogr, 2016, 40 (2): 225-233.

(本文编辑: 张嘉瑜)

【收稿日期】2018-06-22