

## 论 著

## 全迭代重建技术在20%剂量条件下冠状动脉成像中的可行性研究

海军军医大学附属长海医院影像医学科 (上海 200043)

尹 伟 马晓璐 黄 挺  
王敏杰

**【摘要】目的** 探讨超低辐射剂量条件下全模型迭代重建 (IMR) 技术在冠状动脉CTA中的应用价值。**方法** 回顾性分析27例心率小于65 bpm的患者冠状动脉资料, 所有检查均采用了基于管电流调制技术的回顾性心电门控螺旋扫描模式。常规组 (A组) 采用常规辐射剂量 (舒张末期) 联合 iDose<sup>4</sup> (L4) 重建, 低剂量组 (B~F组) 采用低辐射剂量 (收缩末期) 联合不同重建算法重建 [iDose<sup>4</sup> (L4、L7) 和 IMR (L1、L2、L3)]。比较每组图像的CT值、图像噪声、SNR、CNR和图像主观质量评分。采用单因素方差分析和独立样本t检验比较图像客观指标的差异, 采用Kruskal-Wallis非参数检验比较图像主观指标的差异。**结果** 常规组理论辐射剂量为  $(9.77 \pm 2.72)$  msv, 低剂量组理论辐射剂量为  $(1.95 \pm 0.54)$  msv, 两组辐射剂量比较差异有统计学意义 ( $F=19.02$ ,  $P<0.01$ )。常规组与低剂量组 (联合IMR重建组) 图像主观质量间比较差异无统计学意义 ( $P$ 均 $>0.01$ )。**结论** 应用IMR重建技术可显著降低图像噪声, 改善图像质量, 可在大幅度降低辐射剂量后依然保持与常规剂量条件下 iDose<sup>4</sup> 重建时的冠状动脉图像质量水平。

**【关键词】** 全模型迭代重建; 混合迭代; 冠状动脉CT血管成像; 辐射剂量

**【中图分类号】** R814.42; R816.2

**【文献标识码】** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1672-5131.2018.10.015

通讯作者: 王敏杰

## Value of Knowledge-based Iterative Model Reconstruction with 20% Dose in Coronary CT Angiography Imaging

YIN Wei, Ma Xiao-lu, Huang Ting, et al., Department of Radiology, Changhai Hospital, The Navy Military Medical University, Shanghai 200433, China

**[Abstract] Objective** To investigate the value of knowledge-based iterative model reconstruction (IMR) technology for coronary computed tomography on 256-slice spiral CT with radiation dose reduced to 80%. **Methods** Retrospective analysis coronary artery data of 21 cases patients with heart rate is less than 65 bpm, all patients underwent CCTA with retrospective ECG tagging with cardiac dose right helical scan. The data acquisition time window centered at the 75% of the R-R cycle, including a phase tolerance of 4-5%. The images were divided into four groups according to the phase and reconstruction algorithm. Data acquisition at End-systolic phase with iDose<sup>4</sup> (group A), data acquisition at End-systolic phase with IMR (group B); data acquisition at mid-diastolic phase with iDose<sup>4</sup> (group C), data acquisition at mid-diastolic phase with IMR (group D). then, the image noise (SD), signal-to-noise ratio (SNR) and contrast-to-noise ratio (CNR) of ascending aortic root were measured. Objective measurements were compared with one way analysis of variance, and subjective assessments were compared with Kruskal-Wallis H test. **Results** A total of 21 cases of image reconstruction were completed in the End-systolic phase and mid-diastolic phase. Image noise of group C were significantly higher than other groups [ $(33.0 \pm 8.9)$  HU,  $(22.4 \pm 4.1)$  HU,  $(89.6 \pm 53.9)$  HU and  $(27.7 \pm 6.1)$  HU]. Group C compare to other groups, the difference was statistical significance ( $P<0.01$ ), SNR [ $(25.4 \pm 8.2)$ ,  $(21.4 \pm 4.7)$ ,  $t=-2.92$ ,  $-10.85$ ] and CNR [ $(37.4 \pm 13.3)$ ,  $(36.5 \pm 18.1)$ ,  $t=-2.37$ ,  $-5.60$ ] of proximal coronary arteries in IMR were significantly higher than iDose<sup>4</sup> which used the same radiation dose, and there was no significant difference between the group A and group D in SNR [ $(19.0 \pm 6.0)$  vs.  $(21.4 \pm 4.7)$ ,  $t=-1.48$ ] and CNR [ $(29.5 \pm 7.7)$  vs.  $(36.5 \pm 18.1)$ ,  $t=-1.64$ ] (all  $P>0.05$ ). there were significant differences for four groups [ $(3.95 \pm 0.22)$ ,  $4.0$ ,  $(19.5 \pm 0.67)$ ,  $(3.81 \pm 0.4)$ ,  $H=69.12$ ,  $P<0.05$ ] in mean score, and with no significant differences for group A, B and D ( $H=5.56$ ,  $P>0.05$ ). **Conclusion** IMR can significantly reduce image noise, increase SNR and CNR, and improve image quality. The image quality of coronary artery can still be maintained at iDose<sup>4</sup> after reconstruction with a significant reduction in radiation dose.

**[Key words]** Iterative Model Reconstruction; iDose<sup>4</sup>; CCTA; Radiation Dosage

冠状动脉CTA作为一种无创、能准确评价冠心病和心脏结构的有效方法, 被广泛应用于临床, 但其带来的辐射问题亦引起越来越广泛的关注<sup>[1]</sup>。目前降低辐射剂量的主要手段是采用合适的心电门控心脏CT扫描模式、降低管电压、降低管电流、增大螺距以及使用高级迭代算法等<sup>[2-5]</sup>。随着计算机的快速发展, 新的迭代算法与其它低剂量扫描技术的联合使用成为冠状动脉成像的研究热点。全模型迭代重建 (iterative model reconstruction, IMR) 技术是飞利浦最新一代的迭代重建算法, 相比于混合迭代重建算法, IMR技术的降噪能力更强, 图像质量更优。该技术在冠状动脉CTA低剂量成像中的应用报道较少<sup>[6]</sup>。本研究旨在探讨IMR技术在超低剂量成像条件下冠状动脉CTA成像的可行性, 并分析图像质量的客观因素与主观因素。

## 1 资料与方法

**1.1 一般资料** 回顾性分析2017年4月~2017年6月在我院就诊的35位行冠状动脉成像检查患者资料,男19例,女16例,年龄( $54 \pm 14.4$ )岁;体重质量指数(body mass index, BMI)( $26.2 \pm 4.2$ )Kg/m<sup>2</sup>;患者主要临床表现为胸闷、心前区疼痛。纳入标准:窦性心律,心率 $\leq 65$ ;排除标准: BMI  $> 30$ kg/m<sup>2</sup>;心律不齐者;严重肾功能不全(肌酐清除率 $\leq 120$ )收缩期重建图像有明显运动伪影,无法满足诊断要求。最终27例纳入研究,平均心率( $60 \pm 4.5$ )bpm。

**1.2 仪器与方法** 所有冠状动脉CTA检查均在飞利浦256层螺旋CT上完成,心率过高的患者口服倍他乐克进行控制,扫描前进行严格的屏气训练,并于扫描前3min舌下含服硝酸甘油0.5mg,扫描时先行双侧定位像扫描,扫描范围为气管分叉下方10mm至心脏膈面。采用双筒高压注射器以5.0mL/s的流速在右侧肘关节处静脉注射,对比剂采用非离子碘对比剂碘普罗胺(Iopromide, 370mgI/mL)60mL,对比剂注射完毕后加注40mL生理盐水。采用自动触发扫描技术,监测位置定在降主动脉起始处,触发阈值为110HU,当CT值达到阈值后,延迟6秒开始扫描。管电压:100kV,采用自动管电流技术,准直器宽度128 $\times$ 0.625mm,机架旋转速度0.27s/rot,重建参数:层厚:0.9mm;层间距:0.45mm;FOV:210mm $\times$ 210mm;矩阵:512 $\times$ 512;窗宽/窗位:90/750。扫描完成后记录相关数据,如CTDIvol、DLP及ED, ED值=DLP $\times$ 转换系数[k<sub>成人</sub>=0.014mSv/(mGy $\cdot$ cm)]。

将心脏舒张末期原始数据采用iDose<sup>4</sup>(L4)重建,心脏收

缩末期分别采用iDose<sup>4</sup>(L4)、iDose<sup>4</sup>(L7)、IMR(L1)、IMR(L2)和IMR(L3)算法重建,重建后的图像分别记为A、B、C、D、E和F组。iDose<sup>4</sup>采用常规心脏卷积函数XCB, IMR采用cardiac-routine算法。并将图像上传至飞利浦星云工作站(ISP)上进行后处理及图像分析。

**1.3 图像质量评估** 客观评价指标:将ROI置于升主动脉根部(左主干开口层面),大小( $50 \pm 1$ )mm<sup>2</sup>,测量其CT值(记为SI)及标准差(SD值),SD值即为图像噪声;以心包内脂肪作为背景组织,计算主动脉的SNR和CNR。测量时尽量使ROI大小、位置保持一致,避开管壁上钙化和斑块。SNR=主动脉CT值/SD,对比噪声比(CNR)=(SI<sub>主动脉</sub>-SI<sub>心包脂肪</sub>)/SD<sub>主动脉</sub><sup>[7]</sup>。

主观图像质量评分:对数据横断面及MPR图像进行综合评估,内容包括血管和周围组织的对比度、管腔边缘锐利度、主观噪声、整体图像质量。上述指标按照4分法评定<sup>[8]</sup>。4分:血管显示连续,边缘锐利,无伪影;3分:血管显示连续,边缘少许伪影,噪声增大,不影响管腔的评估;2分:血管显示连续,血管边缘中度伪影,管腔模糊,难以评价;1分:血管显示连续,边缘严重伪影,管腔不能评价或血管显示中段移位严重。由2名不知道扫描条件的有经验的放射科医生对图像进行独立评价,最终结果取2名医师评分的平均值。

**1.4 统计学方法** 采用SPSS19.0软件进行统计学分析。所有计量资料采用( $\bar{x} \pm s$ )表示,各组间客观评价指标(噪声、SNR、CNR)采用单因素方差分析,组间两两比较采用Bonferroni检验,主观图像质量评分采用Kruskal-

Wallis非参数检验,其他组与A组间两两比较采用Mann-Whitney U检验。P $< 0.01$ 为差异有统计学意义。2名医师对6组图像主观评分的一致性分析采用 $\chi^2$ 检验。

## 2 结果

共27例检查同时完成收缩期与舒张期图像的重建,并可用于诊断。BMI值为( $24.74 \pm 3.47$ )Kg/m<sup>2</sup>,常规组理论辐射剂量为( $9.77 \pm 2.72$ )msv,低剂量组理论辐射剂量为( $1.95 \pm 0.54$ )msv,两组辐射剂量比较差异有统计学意义(F=19.02, P $< 0.01$ )。辐射剂量见表1。

**2.1 客观指标评价结果** 以常规辐射剂量联合iDose<sup>4</sup>重建算法为标准,随着管电流大幅度降低,在相同重建算法条件下,图像噪声增加,SNR与CNR降低,与常规组比较差异有统计学意义(P均 $< 0.01$ )。在联合IMR重建算法条件下,噪声得到很好的抑制,与常规组比较差异均无统计学意义(P分别为1、1与0.04);而SNR与CNR得到大幅改善,IMR组中等级1重建图像与常规组比较差异无统计学意义(P均 $< 0.01$ )。其中IMR组中等级2与等级3甚至优于常规(P均 $> 0.01$ ),见表2。

**2.2 主观指标评价结果** 分析比较常规组与低剂量组图像质量评分,两位观察者的相关系数为0.864,表明两位观察者的评价具有很高的吻合性。A、B、C、D、E与F组主观整体图像质量评分为[( $3.93 \pm 0.27$ )、( $2.22 \pm 0.75$ )、( $3.0 \pm 0.55$ )、( $3.8 \pm 0.4$ )、( $3.96 \pm 0.19$ )、( $3.96 \pm 0.19$ )],见图1-6;H值为118.7, P $< 0.01$ ],两两比较显示,低剂量B、C组图像质量最差,见图2-3,与A组图像间差异

**表1 固定管电流技术(理论值)与基于管电流调制技术(实际值)辐射剂量比较 ( $\bar{x} \pm s$ )**

分组	辐射剂量		F值	P值
	mA	ED (msv)		
理论峰值管电流	1028.2 ± 285	9.77 ± 2.72	130.39	<0.01
理论低管电流	205.6 ± 57	1.95 ± 0.54		
实际管电流	563.1 ± 153	5.37 ± 1.49		

注:对基于管电流调制技术的回顾性心电门控螺旋扫描数据进行重建,根据重建时相的管电流不同换算成理论峰值管电流组与理论低管电流组。实际管电流组为最终成像所用辐射剂量

**表2 两种重建算法在不同剂量条件下所得图像的客观指标比较 ( $\bar{x} \pm s$ )**

组别	客观指标			
	CT值 (HU)	噪声 (HU)	SNR	CNR
A组	567.14 ± 96.61	34.54 ± 8.09	17.14 ± 4.83	20.36 ± 5.23
B组	574.48 ± 104.09	88.54 ± 34.04	7.24 ± 2.65	8.6 ± 2.86
C组	580.7 ± 103.96	56.65 ± 22.92	7.9 ± 3.3	13.4 ± 5.7
D组	568.53 ± 101.87	35.72 ± 6.78	16.4 ± 4.01	19.69 ± 4.47
E组	568.59 ± 101.89	27.73 ± 5.76	21.21 ± 5.34	25.47 ± 5.98
F组	568.67 ± 101.94	21.44 ± 5.36	27.71 ± 7.21	33.11 ± 8.45
F值	0.085	62.89	67.01	75.84
P值	0.995	<0.01	<0.01	<0.01

注:A组:常规管电流联合iDose<sup>4</sup>(L4)重建图像;B组:低管电流(20%)联合iDose<sup>4</sup>(L4)重建图像;C组:低管电流(20%)联合iDose<sup>4</sup>(L7)重建图像;D组:低管电流(20%)联合IMR(L1)重建图像;E组:低管电流(20%)联合IMR(L2)重建图像;F组:低管电流(20%)联合IMR(L3)重建图像

**表3 两种重建算法在不同剂量条件下所得图像的主观评分比较比较 (分,  $\bar{x} \pm s$ )**

组别	例数	主观噪声				血管边缘锐利度				伪影				图像整体质量			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
A组	27	0	0	5	22	0	0	2	25	0	0	2	25	0	0	2	25
B组	27	5	17	5	0	4	13	10	0	4	11	12	0	5	11	11	0
C组	27	0	6	20	1	1	3	19	4	0	5	17	5	0	4	19	4
D组	27	0	0	18	9	0	0	6	21	0	0	5	22	0	0	5	22
E组	27	0	0	1	26	0	0	2	25	0	0	2	25	0	0	1	26
F组	27	0	0	0	27	0	0	1	26	0	0	2	25	0	0	1	26
H值		119.59				114.83				109.94				118.7			
P值		<0.01				<0.01				<0.01				<0.01			

均有统计学意义(P均<0.01),见图1。低剂量D、E和F组图像质量有较大改善,见图4-6,与A组图像间比较差异无统计学意义(P均>0.01),见表3,见图1。

### 3 讨论

iDose<sup>4</sup>与IMR重建算法都是飞利浦公司最新推出的迭代算法,相比于最基础的滤波反投影重建算法(filtered back projection, FBP),iDose<sup>4</sup>结合了解剖几何形态学重建平台和以X线

衰减特性设计的统计学模型,该平台对数据的完整性要求较低,在一定程度上可以降低辐射的照射量,使图像噪声水平得到有效的抑制,但在重建过程中,由于混合了部分FBP算法,使得降噪水平有限。而IMR算法还加入了强化器官本身固有特性的优化功能以及强化目标病变特性为临床目标的平台,使得该重建算法摆脱了FBP算法,该算法的降噪水平与空间分辨率都得到大幅提高,这让IMR技术在超低辐射剂量条件下进行冠状动脉成像得到理论支

持<sup>[9]</sup>。

回顾性心电门控螺旋扫描是实现冠状动脉CTA成像的最早方式之一,其辐射剂量也是最高的,采用最原始的滤波反投影法重建算法达到5.96~13.52msv(平均8.99msv),而应用较新的混合迭代重建算法可降为2.16~10.15msv(平均4.6msv)<sup>[3]</sup>,目前主要应用于心率快、心律不齐或需要进行心功能评估的患者。然而,除了对心功能评估外,我们只需用伪影最少的心动周期时相进行影像重建,即可进行冠状动脉的诊断,其他时相的数据是不需要的。基于此,CT厂家先后开发了根据患者心电图(ECG)信号调节管电流的技术,即ECG管电流调制技术。该技术可根据心率控制心脏任意时相进行全剂量曝光,而在时间窗外时相只采用全剂量的20%条件进行曝光。该方法相对于单纯的回顾性心电门控扫描,大幅降低了辐射剂量,与固定管电流技术的回顾性心电门螺旋扫描相比,该方法可降低的辐射剂量约40%~48%<sup>[10]</sup>。

迭代重建算法由于可以大幅降低图像噪声,可以在低辐射剂量或低对比剂负荷的心血管CT扫描时稳定图像质量,因此联合高级迭代重建算法可降低辐射剂量。Yin等<sup>[11]</sup>的研究显示在50%的曝光条件下联合高级迭代算法可以完成冠状动脉CTA检查,使得患者接受的辐射剂量在下降52%的情况下,还能保证诊断的敏感度、特异度和准确度。蒋俊<sup>[12]</sup>等在动物研究中表明,用IMR算法可降低70%剂量亦可获得与FBP重建的常规剂量相当的图像质量,且表明iDose<sup>4</sup>重建只能降低50%剂量,而IMR重建算法有进一步降低辐射剂量的潜能。本研究比较了常规管电流条件下的iDose<sup>4</sup>(L4)重建图像



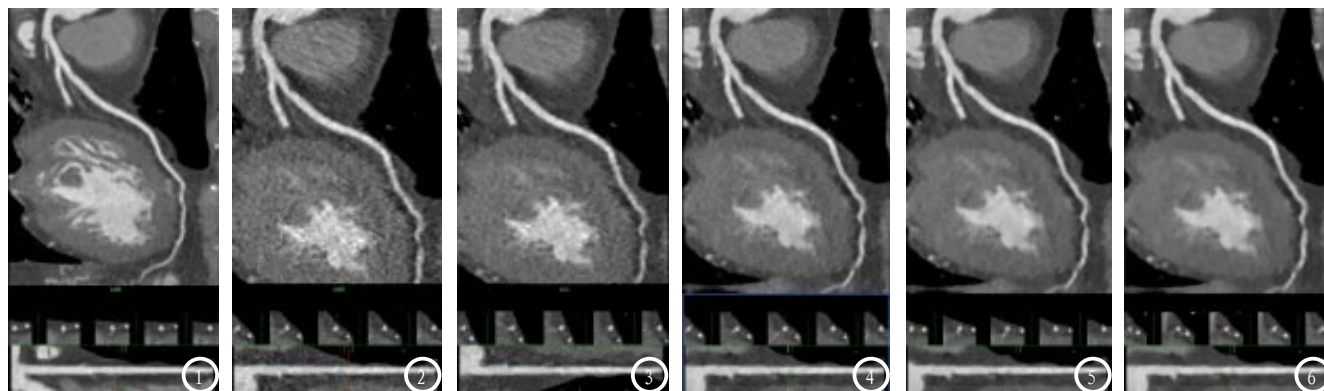


图1-6 男, 74岁, BMI=21.7, ED:4.3mSv。图1为常规管电流条件下联合iDose<sup>4</sup>(L4)重建图像, 图2-6为20%管电流条件下分别联合iDose<sup>4</sup>(L4、L7)重建以及IMR(L1~L3)重建图像; IMR较iDose<sup>4</sup>可明显降低图像噪声, 提高图像质量。

与低管电流条件下的iDose<sup>4</sup>(L4、L7)与IMR(L1~L3)重建图像, 最后得到的低剂量组理论辐射剂量为 $(1.95 \pm 0.54)$ mSv, IMR重建算法比iDose<sup>4</sup>最高降噪水平的降噪能力更高, 有较iDose<sup>4</sup>重建算法进一步降低了辐射剂量的潜能。

本研究的局限性: 1. 未对各组图像中的病灶进行斑块比较、分析, 大幅度降低辐射剂量是否影响斑块的分析有待研究; 2. 本论文降低辐射的尺度未应用到前瞻性心电门控扫描模式中。3. 分组较少, 未探讨iDose<sup>4</sup>算法与IMR算法下最佳管电流水平。

综上所述, 应用IMR重建技术, 可以通过大幅降低管电流的方法来降低辐射剂量, 并可保证图像质量, 因此, 对于肥胖病人的检查是一种行之有效的降低剂量的方法, 具有重要的临床应用价值。

## 参考文献

- [1] Sodickson A, Baeyens P F, Andriole K P, et al. Recurrent CT, cumulative radiation exposure, and associated radiation-induced cancer risks from CT of adults[J]. Radiology, 2009, 251(1): 175-184.
- [2] 张秉权, 刘永熙, 邓宇, 等. 前瞻性 vs 回顾性MSCT在儿童复杂性先天性心脏病中的成像质量与剂量比较[J]. 中国CT和MRI杂志, 2018, 16(2): 94-97.
- [3] 杨利莉, 汪芳, 赵艳红, 等. 基于iDose4迭代重建的回顾性心电门控冠状动脉CT血管成像低剂量技术的初步研究[J]. 实用放射学杂志, 2014, 30(1): 128-132.
- [4] 孙凯, 韩瑞娟, 赵瑞平, 等. 大螺距双源CT采用bolus-tracking团注法冠状动脉成像的可行性[J]. 中国医学影像技术, 2012, 28(11): 4962-4967.
- [5] Zhang L J, Qi L, Wang J, et al. Feasibility of prospectively ECG-triggered high-pitch coronary CT angiography with 30 mL iodinated contrast agent at 70 kVp: initial experience[J]. European Radiology, 2014, 24(7): 1537-1546.
- [6] Zhang F, Yang L, Song X, et al. Feasibility study of low tube voltage (80kV) coronary CT angiography combined with contrast medium reduction using iterative model reconstruction (IMR) on standard BMI patients[J]. British Journal of Radiology, 2016, 89(1058): 20150766.
- [7] 侯阳, 于兵, 郭启勇, 等. 迭代重建对前置门控冠状动脉CT图像质量及辐射剂量的影响[J]. 中华放射学杂志, 2013, 47(4): 305-309.
- [8] 汪芳, 郝万庆, 杨利莉, 等. 256排宽体探测器CT智能心电门控技术在非控制心率患者冠状动脉CTA中的应用[J]. 中国医学影像技术, 2017, 33(7): 1080-1084.
- [9] Chang W, Lee J M, Lee K, et al. Assessment of a model-based, iterative reconstruction algorithm (MBIR) regarding image quality and dose reduction in liver computed tomography[J]. Investigative Radiology, 2013, 48(8): 598-606.
- [10] Jun B R, Yong H S, Kang E Y, et al. 64-slice coronary computed tomography angiography using low tube voltage of 80 kV in subjects with normal body mass indices: comparative study using 120 kV[J]. Acta Radiologica, 2012, 53(10): 1099-1106.
- [11] Yin W H, Lu B, Li N, et al. Iterative Reconstruction to Preserve Image Quality and Diagnostic Accuracy at Reduced Radiation Dose in Coronary CT Angiography: An Intraindividual Comparison[J]. Jacc Cardiovascular Imaging, 2013, 6(12): 1239-1249.
- [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.

(本文编辑: 谢婷婷)

【收稿日期】2017-11-08