

Auto-kV 技术联合 AI 深度学习算法(Clear Infinity) 在冠脉“精准”双低成像中的应用

张 斌¹, 高思喆¹, 郭文力¹, 李雨桐²

(1. 中国医科大学附属盛京医院放射科, 辽宁 沈阳 110004;

2. 东软医疗系统股份有限公司 CT 产品事业部, 辽宁 沈阳 110167)

[摘要] 目的: 探讨 Auto-kV 技术联合 AI 深度学习算法(Clear Infinity)在冠状动脉“双低”成像中的价值。方法: 连续选取 62 位行冠脉 CTA 检查者, 分为 A、B 两组, 每组 31 例。A 组(实验组)采用 Auto-kV 技术扫描, O-Dose=0.7; B 组(对照组)采用常规 120 kV 扫描, O-Dose=1.0。A 组对比剂用量依据 Auto-kV 技术给定管电压: 140 kV-0.9 mL/kg; 120 kV-0.8 mL/kg; 100 kV-0.7 mL/kg; 80 kV-0.6 mL/kg; 70 kV-0.5 mL/kg; 60 kV-0.4 mL/kg, B 组对比剂用量统一为 0.8 mL/kg。对比剂注射速率=对比剂用量/12 s。将 A 组原始数据采用迭代重建算法(Clear View)及 AI 重建算法(Clear Infinity)重建出两组图像, 分别命名为 A1 组和 A2 组。迭代及 AI 算法的权重均设定为 70%。B 组原始数据采用滤波反投影法(FBP)重建。采用统计学分析图像质量、碘负荷及辐射剂量的差异。结果: A1、A2 组图像冠脉各节段内 CT 值均高于 B 组, 差异均有统计学意义($P < 0.001$)。A1、A2 组的噪声显著低于 B 组, 差异有统计学意义($P < 0.001$)。A1、A2 组的信噪比及对比噪声比显著高于 B 组, 差异有统计学意义($P < 0.001$)。A、B 两组间 CTDI、DLP、ED 及碘负荷的差异均有统计学意义($P < 0.001$), A 组的碘负荷及辐射剂量均显著低于 B 组。主观评测中三组间对比度无统计学差异; A1、A2 组的主观噪声及诊断置信度优于 B 组, 有统计学意义, A1、A2 组间没有统计学意义; 在锐利度及细节显示上三组间均有统计学意义, 且 A2 组优于 A1 组优于 B 组。结论: Auto-kV 技术联合 AI 深度学习算法(Clear Infinity)应用于冠状动脉 CTA 中可实现个性化扫描, 显著降低对比剂用量及辐射剂量, 并保证图像质量。

[关键词] 冠状血管; 体层摄影术, X 线计算机

[中图分类号] R543.3; R814.42

[文献标识码] A

[文章编号] 1008-1062(2024)04-0283-05

DOI:10.12117/jccmi.2024.04.013

Applications of Auto-kV technique combined with AI deep learning algorithm(Clear Infinity) in coronary CTA with low dose and low iodine load

ZHANG Bin¹, GAO Si-zhe¹, GUO Wen-li¹, LI Yu-tong²

(1. Department of Radiology, Shengjing Hospital of China Medical University, Shenyang 110004, China;

2. CT Products Business Division, Neusoft Medical System Co., Ltd, Shenyang 110167, China)

Abstract: Objective: To explore the value of Auto-kV technology combined with AI deep learning algorithm(Clear Infinity) in coronary CTA with low dose and low iodine load. **Methods:** Sixty-two patients who underwent coronary CTA were selected and divided into two groups of 31 cases each: group A (experimental group) was scanned by Auto-kV technology with O-Dose=0.7; group B (control group) was scanned by conventional 120 kV with O-Dose=1.0. The dosage of contrast agent of group A was based on the tube voltages given by Auto-kV technology: 140 kV-0.9 mL/kg, 120 kV-0.8 mL/kg, 100 kV-0.7 mL/kg, 80 kV-0.6 mL/kg, 70 kV-0.5 mL/kg, 60 kV-0.4 mL/kg, and the dosage of group B was standardized as 0.8 mL/kg. The injection time was 12 seconds. The raw data of group A were reconstructed by iterative reconstruction algorithm(Clear View) and AI reconstruction algorithm (Clear Infinity) to produce two groups of images, named group A1 and group A2, respectively. The weights of both the iterative and AI algorithms were set to 70%. The raw data of group B were reconstructed by filtered back projection(FBP). The differences in image quality, iodine load and radiation dose were analyzed using statistics. **Results:** There were significant differences in CT value among the three groups, the CT value of group A1 and A2 were higher than group B. There were significant differences in image noise among the three groups, the image noise of group A1 and A2 was significantly lower than group B. There were significant differences in SNR and CNR among the three groups. The SNR and CNR of group A1 and A2 were significantly higher than group B. There were significant differences in CTDI, DLD, ED and iodine load between groups A and B. There was no statistical difference in subjective contrast among the three groups. The subjective noise and diagnostic confidence of group A1 and A2 were better than group B, not between groups A1 and A2. There were significant differences in sharpness and detail among the three groups. Group A2 was better than group A1 and better than group B. **Conclusion:** Auto-kV technology combined with AI deep learning algorithm (Clear Infinity) can be used in

[收稿日期] 2023-08-31; **[修回日期]** 2023-09-10

[作者简介] 张斌(1986-), 男, 辽宁瓦房店人, 技师。E-mail: zb18940256749@126.com

[通信作者] 郭文力, 中国医科大学附属盛京医院放射科, 110004。E-mail: guo_wl68@163.com

[基金项目] 辽宁省高性能医疗器械应用示范项目[202001]。

coronary CTA to achieve individualized scanning, significantly reduce the dosage of contrast agent and radiation dose, and improve image quality.

Key words: Coronary Vessels; Tomography, X-Ray Computed

“精准医疗”的概念已经渗透进医疗的各个领域,在医学影像技术方面,我们致力于个体化的成像方案^[1]。冠状动脉 CTA 是公认的心血管疾病首选无创检查^[2-3]。同时人们对于检查的辐射剂量的关注也与日俱增,传统的滤波反投影算法简单、重建速度快,被广泛用于 CT 图像重建,但图像质量依赖于辐射剂量。因此目前“双低”扫描联合迭代重建算法的成像方法被广泛使用并获得认可^[4-5]。但“双低”扫描对操作者的要求较高,若参数选择不当则会增加失败的几率^[6];且使用迭代权重过大还会出现过渡平滑、丢失细节等现象,不利于影像学诊断。

Auto-kV 和 AI 深度学习算法(Clear Infinity)是东软医疗的创新产品。Auto-kV 技术是管电流自动调制技术的衍生,依据定位像不仅可以提供管电流自动调制还能提供管电压自动调制,为降低碘流率提供可信参考。Clear Infinity 是一种基于卷积神经网络的 AI 深度学习重建算法^[7]。相比于迭代重建算法,其在进一步降低图像噪声的同时,还能最大程度保留图像细节,避免出现“蜡像”样改变。本研究与常规 120 kV 扫描联合 FBP 重建成像及 Auto-kV 联合迭代重建成像相比较,探讨 Auto-kV 联合 Clear Infinity 的临床价值。

1 资料与方法

1.1 病例选择

连续纳入我院 2021 年 10 月—2022 年 12 月间 62 例行冠脉 CTA 的检查者。依据受检者纳入顺序,按单双数号分别纳入 A、B 两组,每组 31 例。排除标准:①明确患甲亢者;②已知碘对比剂过敏者;③严重肝、肾功能不全者;④妊娠及哺乳期妇女;⑤严重的心律不齐、冠状动脉搭桥及支架术后者;⑥冠状动脉钙化积分>100 分;⑦失代偿性心功能不全及无法配合屏气者等。

本研究经我院伦理委员会批准(伦理编号:2022PS100J),所有受检者均自愿参与,并签署知情同意书。

1.2 扫描方法及图像重建

所有受检者行冠脉 CTA 检查均由同一名技师(具有 11 年冠脉扫描经验)采用东软 NeuViz Glory CT 行回顾门控扫描完成。A 组为实验组,采用 Auto-kV 技术扫描,管电压依据正、侧定位像自动给出;B 组为对照组,采用 120 kV 扫描。两组均采用管

电流自动调制技术(O-Dose),A 组 O-Dose 指数设定为 0.7;B 组 O-Dose 指数设定为 1.0。管球旋转时间 0.259 s,准直器设定为 256×0.625 mm,螺距 0.18。扫描范围:自气管分叉下 1 cm 处至心底。使用对比剂阈值触发技术,将感兴趣气管分叉层面降主动脉设为感兴趣区,自动触发阈值为 180 HU。达阈值后嘱患者屏气后进行扫描。采用德国 Ulrich 高压注射器,前臂肘正中或贵要静脉留置 18 g 静脉留置针。对比剂选用碘克沙醇(320 mgI/100 mL),A 组对比剂用量依据 Auto-kV 技术给定管电压选择:140 kV-0.9 mL/kg;120 kV-0.8 mL/kg;100 kV-0.7 mL/kg;80 kV-0.6 mL/kg;70 kV-0.5 mL/kg;60 kV-0.4 mL/kg,B 组对比剂用量统一为 0.8 mL/kg。对比剂注射速率=对比剂用量/12 s,对比剂注射后以同等速率追加 8 s 生理盐水。若受检者心率≥90 次/min,口服倍他乐克 25~50 mg 以降低心率。

将 A 组原始数据采用迭代重建算法(Clear View)及 AI 重建算法(Clear Infinity)重建出两组图像,分别命名为 A1 组和 A2 组。迭代重建及 AI 算法的权重均设定为 70%。B 组原始数据采用滤波反投影法(FBP)重建。三组图像的滤波函数均为 Cardiac20;层厚 1 mm,层间隔 0.5 mm;重建视野 250 mm,重建矩阵 512×512。

1.3 图像的评价

图像质量主观评价:选择受检者最佳时相的横断面图像数据传至 AVW 1.0.8 工作站进一步分析。由两名具有 10 年以上冠状动脉 CT 诊断经验的医师采用双盲法对图像质量进行综合评估,评估内容包括:对比度、锐利度、主观噪声及诊断置信度。上述主观指标均按照 Likert 4 分法评定^[8],4 分:血管与周围组织对比极佳,血管及解剖结构边缘清晰,噪声极小,诊断置信度高;3 分:血管与周围组织对比良好,血管及解剖结构边缘欠清,噪声小,诊断置信度良;2 分:血管与周围组织对比尚可,血管及解剖结构边缘模糊,噪声略大,诊断置信度不足;1 分:血管与周围组织的对比差,血管及解剖结构边缘无法区分,噪声极大,无法诊断。两名医师评分不一致时由双方协商后给出最终评分。

图像质量客观评价:在正、侧定位像选取扫描范围的中心位置,分别测量胸廓左右径和前后径;在冠状动脉左主干发出层面主动脉根部、左冠状动脉主干、右冠状动脉中及远段分别设置感兴趣区测量 CT

值,若冠状动脉呈左优势分布,则在左冠状动脉前降支或回旋支设置感兴趣区。以主动脉根部 CT 值标准差作为整体图像噪声,同层冠状动脉左主干周围心包脂肪 CT 值作为背景^[9],按照公式:对比噪声比(CNR)=(CT_{主动脉}-CT_{心包脂肪})/SD_{主动脉}^[10];信噪比(SNR)=CT_{主动脉}/SD_{主动脉},计算 CNR 及 SNR。

1.4 辐射剂量及碘负荷评价

记录每位受检者检查的剂量指数(CT dose index,CTDI)及剂量长度乘积(Dose-length products,DLP)以评价患者所受辐射剂量。有效辐射剂量(Effective dose,ED)=DLP×k (k=0.014 mSv/(mGy·cm)^[11]。受检者碘负荷以该受检者所使用对比剂总量与对比剂浓度乘积来表示。

1.5 统计学分析

应用 IBM SPSS 23.0 及 MedCalc 19.0.4 软件

进行统计学分析。符合正态分布且方差齐的数据以 $\bar{x}\pm s$ 表示,采用独立样本 *t* 检验或方差分析比较组间统计学差异;正态数据方差不齐及偏态数据以 M(P25,P75)表示,采用 Mann-Whitney U 秩和检验或 Kruskal-Wallis H 秩和检验比较组间统计学差异;主观评分采用卡方检验比较组间统计学差异。采用 Kappa 检验对两名观察者一致性进行分析。*P*<0.05 表示实验结果具有统计学意义。

2 结果

2.1 受检者基本信息比较

见表 1。各项指标间均无统计学差异(*P*>0.05)。

2.2 图像质量评价与比较

主观评价见表 2 和图 1~3:两名医师对三组图像的主观评分显示了较好组间一致性。对图像对比

表 1 两组受检者基本信息比较

	体质量(kg)	身高(m)	BMI(kg/m ²)	初始心率(次/min)	扫描长度(mm)	胸廓前后径(mm)	胸廓左右径(mm)
A 组	69.7±10.9	1.66±0.09	25.1±3.0	73.5±5.7	120.4±6.0	261.5±9.1	177.0±7.6
B 组	68.5±10.5	1.66±0.07	24.7±2.7	74.6±5.6	120.3±7.5	262.0±8.8	176.5±8.1
<i>t</i>	0.451	0.185	0.476	0.789	0.919	0.128	0.089
<i>P</i>	0.740	0.269	0.499	0.472	0.461	0.287	0.791

表 2 三组图像的主观图像质量比较

	对比度				锐利度				主观噪声				诊断置信度			
	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1
A1 组	26	5	0	0	20	9	2	0	23	8	0	0	25	6	0	0
A2 组	27	4	0	0	28	3	0	0	26	5	0	0	26	5	0	0
B 组	20	11	0	0	8	17	6	0	16	10	5	0	16	9	6	0
χ^2	5.478				30.539				14.836				10.952			
<i>P</i>	0.065				0.001				0.005				0.027			
<i>P</i> _{A1-A2}	0.718				0.036				0.082				0.074			
<i>P</i> _{A1-B}	0.082				0.001				0.046				0.043			
<i>P</i> _{A2-B}	0.038				0.001				0.011				0.037			

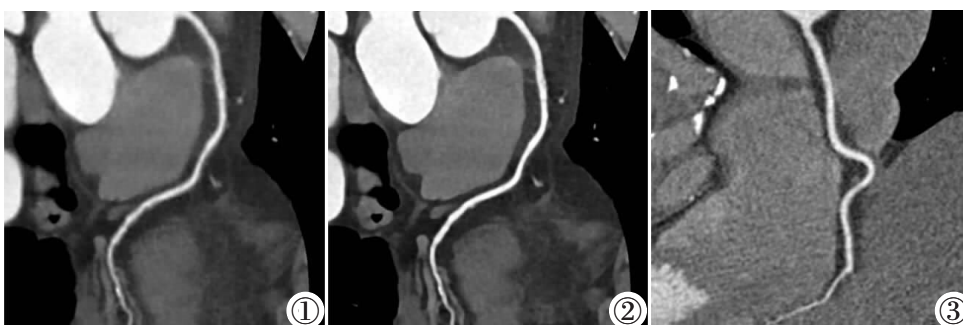


图 1~3 两名受检者分别来自 A、B 组,体质量均为 75 kg,身高均为 173 cm。但两名受检者的胸廓前后径及左右径不同。图 1,2 为同一受检者,采用 Auto-kV 技术扫描,管电压为 80 kV,对比剂用量 45 mL,注射速率 3.75 mL/s;图 3 受检者采用 120 kV 扫描,对比剂用量 60 mL,注射速率 5.0 mL/s。

图 1 采用 Clear View 重建;图 2 采用 Clear Infinity 重建;图 3 采用 FBP 重建。图 1,2 在对比度、主观噪声及诊断置信度均显著优于图 3,但图 2 的锐利度及细节显示要显著优于图 1 和图 3。

Figure 1~3. Two patients were from group A and group B with the same body weight of 75 kg and body height of 173 cm. But the anterior and posterior thoracic diameter and the left and right meridians of the two patients were different. Figure 1, 2 are the same patient scanned by Auto-kV technique (80 kV), the dosage of contrast agent was 45 mL and injection rate was 3.75 mL/s. Figure 3: patient was scanned by 120 kV, the dosage of contrast agent was 60 mL and injection rate was 5.0 mL/s. Figure 1 was reconstructed by Clear View; Figure 2 was reconstructed by Clear Infinity; Figure 3 was reconstructed by FBP. The contrast, subjective noise and diagnostic confidence of Figure 1, 2 were significantly better than that of Figure 3, but the sharpness and detail of Figure 2 was significantly better than those of Figure 1 and Figure 3.

度、锐利度、主观噪声及诊断置信度的 Kappa 值分别为 0.82、0.76、0.82、0.81。

客观评价见表 3,4: A1、A2 组图像冠脉各节段内 CT 值均高于 B 组,噪声显著低于 B 组,差异均

表 3 三组图像不同部位的 CT 值比较

	主动脉根部	左冠状动脉主干	右冠状动脉中段	右冠状动脉水平段	心包脂肪
A1 组	470.8(422.3,489)	443.3(403.3,476.1)	446.7(378.5,472)	419.3(373.9,454.1)	-103.6(-109.3,-102.0)
A2 组	469.8(425.5,491.2)	440.8(403.2,475.7)	449.6(375.1,472.3)	420.4(373.2,455.6)	-101.3(-110.5,-101.7)
B 组	373.5(359,392.5)	363.2(345.4,387.2)	360.2(349.1,379.1)	352.5(340.8,369.8)	-108.4(-113.8,-100.3)
H	50.972	50.168	33.349	31.215	2.161
P	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.339
P _{A1-A2}	0.977	0.929	0.946	0.972	
P _{A1-B}	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	
P _{A2-B}	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	

表 4 三组图像的客观评价指标比较

	噪声值(HU)	信噪比	对比噪声比
A1 组	21.2(19.1,22.8)	22.1(20.3,23.8)	27.1(26.0,28.3)
A2 组	18.4(16.6,19.8)	25.4(23.6,27.2)	31.2(29.9,32.7)
B 组	38.5(36.1,40.6)	9.7(9.1,10.4)	12.4(12.1,12.9)
H	66.359	67.868	67.634
P	<0.001	<0.001	<0.001
P _{A1-A2}	0.075	0.032	0.036
P _{A1-B}	<0.001	<0.001	<0.001
P _{A2-B}	<0.001	<0.001	<0.001

有统计学意义(均 $P<0.001$)。A1、A2 组的信噪比及对比噪声比显著高于 B 组,差异有统计学意义(均 $P<0.001$)。

2.3 辐射剂量及碘负荷

见表 5。A 组 31 例检查中,管电压选择 120 kV 1 例;100 kV 10 例;80 kV 12 例;70 kV 8 例。A、B 两组间 CTDI、DLP、ED、对比剂用量及碘负荷的差异均有统计学意义(均 $P<0.001$),A 组的有效辐射剂量及碘负荷均显著低于 B 组。

表 5 两组辐射剂量及碘负荷的比较

	CTDI(mGy)	DLP(mGy×cm)	ED(mSv)	对比剂用量(mL)	碘负荷(g)
A 组	8.2(4.8,12.1)	202.7(125.8,297.2)	2.9(2.0,4.5)	39(36,53)	12.5(11.5,17.0)
B 组	20.0(17.1,28.0)	498.7(412.5,688.9)	7.0(5.8,9.6)	56(52,60)	17.9(16.6,19.2)
U	43		28		200
P	<0.001		<0.001		<0.001

3 讨论

本研究显示 Auto-kV 技术联合 AI 深度学习算法(Clear Infinity)及迭代重建算法(Clear View)应用于冠状动脉 CTA 中,均可取得较传统滤波反投影法重建(FBP)更好的主、客观图像质量,并可显著降低辐射剂量和碘负荷,减少患者身体负荷。应用 AI 深度学习算法(Clear Infinity)在锐利度及主观细节显示上要优于迭代重建算法(Clear View)。

在以往的双低冠脉检查中,扫描技师依据患者体质量选择合适的管电压^[2],再依据所选管电压确定对比剂注射参数,这种扫描方式对技师专业能力要求高、操作者依赖性大。体质量相同的两个患者,胸廓的前后径、左右径都可能相差很大,因此基于体质量所确定的管电压及对比剂注射参数难以做到“准确”双低。本研究采用的 Auto-kV 技术是基于上述问题开发的自动管电压匹配技术。在采集定位像的过程中,探测器接收透射人体的射线,并自动检测射线的光子数及光子的能量从而计算出扫描部位的厚度及密度,进而给出更加合理的管电压值。扫描技

师在预先得知扫描时所用管电压后再确定对比剂注射参数,会更加精准。在本研究中 A 组使用 Auto-kV 技术 31 例检查中,管电压选择 120 kV 1 例;100 kV 10 例;80 kV 12 例;70 kV 8 例。70 kV 和 80 kV 检查所占实验组比例约为 64.5%(20/31),表明了低管电压在冠状动脉 CT 检查中的可行性,这与 Wang 等^[3]的研究结果一致。管电压降低,X 线光子能量更接近于碘的 K 壳层结合能,光电效应发生的几率增加,以至于碘对比剂与周围组织形成更好的对比度^[4],提升对比噪声比,对于 CTA 成像获益显著。为了维持血管的最佳强化效果,本研究采用随管电压降低逐级减低碘流率的对比剂注射方案。以主动脉根部 CT 值为例:70 kV (460.1 HU)>80 kV (423.6 HU)>100 kV (397.3 HU)>120 kV (344.5 HU),除 70 kV 外,动脉血管均在最佳强化范围内(300~450 HU)^[2]。

冠状动脉 CT 成像是图像综合素质要求较高的一种检查,包括图像对比度、空间分辨率、密度分辨率及噪声等^[2],而噪声是影响空间分辨率和密度分辨率的主要因素。图像噪声过大会影响冠脉细节及软斑块的显示,因此迭代重建算法是“双低”扫描

的前提基础^[6],但若刻意追求低剂量,使用高等级的迭代重建,则会出现过渡平滑、丢失细节的现象,不利于冠脉疾病的诊断^[15-16]。在本研究中,A1组、A2组的噪声显著低于B组,A1、A2组的信噪比及对比噪声比显著高于B组。A2组的信噪比及对比噪声比高于A1组,组间有统计学差异,而A2组的噪声低于A1组约12%,但组间没有统计学差异,可能与非参数统计学的检验效能较低有关。Clear Infinity是基于神经网络构架的AI算法,其在降噪的同时,更注重于细节的刻画,所以在主观评测中,两名医师对图像的锐利度及细节显示认为A2组要优于A1组,并取得了较好的一致性(Kappa值=0.76)。A1组使用70%的迭代权重,Clear View重建出现过渡平滑、血管边缘模糊的现象,影响了图像细节显示。因此在细节显示上A2组要优于A1组。在新近的研究中,基于人工智能深度学习技术已经被用来降低图像噪声,改善细节丢失等问题^[17-19]。Clear Infinity的原理是:利用深度卷积神经网络模型对高质量和低质量CT数据进行训练,使网络模型能够学习数据噪声和伪影分布。将数据中的结构信息与噪声和伪信息有效分离,实现降噪和伪信息去除。即在模型的训练过程中,以低质量的CT数据作为网络的输入,并以相应的高质量CT数据作为网络的学习目标。通过多次迭代,网络输出逐渐接近高质量的数据,并完成训练。在该应用中,可以将CT数据直接输入到网络模型中,获得高质量的CT重建图像,并最大程度保留图像的细节。

本研究的局限性:①入组病例数偏少,需要更多的临床病例来验证研究结果的准确性。②在病例纳入期间,A组未能包含适用140kV及60kV扫描的病例,140kV及60kV扫描联合Clear Infinity重建是否能满足诊断需求尚不知晓,有待于进一步研究。③由于低kV成像不利于支架及高钙化积分血管的诊断,因此本研究并未含括支架及钙化积分>100的病例,有待于进一步研究。④没有与冠状动脉造影进行比较,尚不知晓Auto-kV技术联合Clear Infinity重建能否对斑块的形态及血管狭窄的程度准确显示。

综上,Auto-kV技术可以智能的选择管电压,为选择碘流率提供可信参考;AI深度学习算法(Clear Infinity)在显著降低噪声的同时,还能最大限度的保留图像细节。Auto-kV技术联合AI深度学习算法(Clear Infinity)应用于冠状动脉CTA中可实现个体化的扫描,在保证图像质量的同时,可显著降低辐射剂量及对比剂用量。

[参考文献]

- [1]冯晓源. 精准医疗,影像先行[J]. 中华放射学杂志,2016,50(1): 1-2.
- [2]宋光义. 多层螺旋CT冠状动脉血管成像[J]. 放射学实践,2003,18(7):518-520.
- [3]Dreisbach JG, Nicol ED, Roobottom CA, et al. Challenges in delivering computed tomography coronary angiography as the first-line test for stable chest pain[J]. Heart, 2018, 104(11): 921-927.
- [4]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):305-340.
- [5]高思喆,马跃,侯阳,等. 全模型迭代重建算法(IMR)在“双低”冠状动脉CTA成像中应用价值的探讨[J]. 中国临床医学影像杂志,2018,29(3):177-181.
- [6]李岩,束敏,李坤成. 规范化应用“双低”扫描CT血管成像[J]. 中国医学影像技术,2018,34(1):128-131.
- [7]章云港,易本顺,吴晨玥,等. 基于卷积神经网络的低剂量CT图像去噪方法[J]. 光学学报,2018,38(4):123-129.
- [8]Hou Y, Yue Y, Guo W, et al. Prospectively versus retrospectively ECG-gated 256-slice coronary CT angiography: image quality and radiation dose over expanded heart rates [J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2012, 28(1): 153-162.
- [9]余美,马跃,王玉科,等. 不同低对比剂注射方案对冠状动脉CTA图像质量影响的初步研究 [J]. 中国临床医学影像杂志,2015,26(11):779-783.
- [10]Hausleiter J, Meyer T, Hermann F, et al. Estimated Radiation Dose Associated With Cardiac CT Angiography [J]. JAMA, 2009, 301(5): 500-507.
- [11]Zhang LJ, Li X, Schoepf UJ, et al. Non-Electrocardiogram-Triggered 70-kVp High-Pitch Computed Tomography Angiography of the Whole Aorta With Iterative Reconstruction: Initial Results[J]. J Comput Assist Tomogr, 2016, 40(1): 109-117.
- [12]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.
- [13]Wang Y, Chen Y, Liu P, et al. Clinical effectiveness of contrast medium injection protocols for 80-kV coronary and craniocervical CT angiography—a prospective multicenter observational study[J]. Eur Radiol, 2022, 32(6): 3808-3818.
- [14]武永杰,郑敏文,赵宏亮,等. 低浓度对比剂联合应用低kV和迭代重建技术的冠状动脉双源CT成像可行性 [J]. 中华医学杂志,2014,94(29):2260-2263.
- [15]Singh S, Kalra MK, Hsieh J, et al. Abdominal CT: companionship of adaptive statistical iterative and filtered back projection reconstruction techniques[J]. Radiology, 2010, 257(2): 373-383.
- [16]Nelson RC, Feuerlein S, Boll DT. New iterative reconstruction techniques for cardiovascular computed tomography: how do they work. and what are the advantages and disadvantages? [J]. J Comput Assist Tomogr, 2011, 5(5): 286-292.
- [17]Kang E, Min J, Ye J. A deep convolutional neural network using directional wavelets for low-dose X-ray reconstruction[J]. Med Phys, 2017, 44(10): 360-375.
- [18]赵莹,刘爱连,刘静红,等. 基于深度学习的像素闪烁算法对高体质质量指数患者低剂量腹部CT平扫图像质量的影响[J]. 中国医学影像技术,2018,34(3):434-438.
- [19]Chen H, Zhang Y, Mannudeep KK, et al. Low-dose CT with a residual encoder-decoder convolutional neural network[J]. IEEE Trans Med Imaging, 2017, 36(12): 2524-2535.