❖综述

Application of iterative reconstruction combined with low tube voltage in low dose CT of children

SUN Jihang，PENG Yun*
(Imaging Centre，Beijing Children's Hospital，Capital Medical University，National Center for Children's Health，Beijing 100045，China)

[**Abstract**] CT has been widely used in clinic for its rapid，simple and non-invasive characteristics. How to reduce radiation dose，especially in children during CT has become a topical subject. Iterative reconstruction (IR) technique can reduce radiation dose of CT in children，in combination of low tube voltage can further reduce radiation dose possibly. The application of IR combined with low tube voltage technology in low dose CT in children were reviewed in this article.

[**Key words**] Tomography，X-ray computed；Iterative reconstruction；Child；Image processing，computer-assisted
DOI：10.13929/j.1003-3289.201708018

迭代重建联合低电压技术应用于儿童低剂量 CT 的进展

孙记航 综述，彭 芸* 审校
（首都医科大学附属北京儿童医院影像中心 国家儿童医学中心，北京 100045）

[**摘 要**] CT 检查以其快速、简便、无创的特点在临床应用日益广泛，如何降低 CT 检查的辐射剂量，尤其是降低儿童 CT 检查的辐射剂量是热点问题。迭代重建技术(IR)可降低儿童 CT 扫描剂量，联合低电压技术可进一步实现降低辐射剂量。本文对 IR 联合低电压技术应用于儿童低剂量 CT 的研究进展进行综述。

[**关键词**] 体层摄影术，X 线计算机；迭代重建；儿童；图像处理，计算机辅助
[**中图分类号**] R814.42 [**文献标识码**] A [**文章编号**] 1003-3289(2018)02-0314-04

CT 检查以其快速、简便、无创的特点在临床应用日益广泛，但随之而来的辐射剂量增加以及致癌风险增高问题受到关注。儿童处于生长发育期，细胞分裂速度快，对放射线的敏感度较成人高。研究[1]发现同样接受 10 mGy 射线后，低龄患儿较成年患者的患癌率明显增高，提示放射线对儿童的损伤比成人更高。因此，如何降低 CT 检查的辐射剂量，尤其是降低儿童 CT 检查的辐射剂量成为热点问题。早期降低辐射剂量的方法主要集中于如何优化扫描程序[2]，但降低程度有限；目前主要采用迭代重建技术（iterative reconstruction，IR），可大幅度减低儿童 CT 扫描剂量。由于儿童身体体积较成人小，可采用 IR 联合低电压技术来进一步实现降低辐射剂量的可能。本文对 IR 联合低电压技术应用于儿童低剂量扫描的研究进展进行综述。

1 IR 联合低电压技术的应用基础

1.1 IR 技术概述 IR 技术自 2009 年始广泛应用于临床，此后关于 IR 应用于低剂量的研究多见。IR 已成为各种 CT 设备必备的图像重建算法，如自适应迭代重建技术（adaptive statistical iterative reconstruction，ASIR）、iDOSE、鹰眼技术（sinogram-affirmed iterative reconstruction，SAFIRE）及自适应迭代剂量降低重建技术（adaptive iterative dose reduction，AIDR）。不同迭代模型的迭代水平也不相同。与经典的滤过反射投影算法（filtered back-projection，FBP）相比，IR 算法耗时较长，特别是基于

[**第一作者**] 孙记航(1982—)，男，北京人，硕士，副主任医师。研究方向：儿童影像。E-mail：jihangsuns@163.com
[**通信作者**] 彭芸，首都医科大学附属北京儿童医院影像中心 国家儿童医学中心，100045。E-mail：ppengyun@yahoo.com
[**收稿日期**] 2017-08-04 [**修回日期**] 2017-10-11

模型的迭代重建算法（model-based iterative reconstruction，MBIR）在常规迭代模型中加入了焦点模型、光子模型等计算过程，降低噪声效果更为显著。

1.2　低电压技术的特点　管电压指管球产生 X 线光子能量峰值的位置，常用 80、100、120、140 kV。管电压降低时，伴随的 X 线光子通量的衰减可成指数倍快速降低。为保证 X 线光子通量的恒定，需大幅度提高管电流，如管电压 80 kV 时，约需 120 kV 时的 3 倍管电流[3]，形成"低管电压-高管电流"的扫描方案。当管电压降低而管电流升高不足时，可致图像质量降低。

低电压成像的优势为可提高碘离子的吸收，以增强碘对比剂的强化效果。碘对比剂的 CT 值可随光子能量值或管电压降低而升高，降低管电压使得混合能量 X 线光子的平均能量更接近碘吸收的 k 峰（33 keV），从而增加光电效应、减少康普顿散射，最终致碘的衰减值增加。研究[4]证实，当电子能量较低时，碘对比剂的 CT 值增高。低电压已被广泛应用于增强 CT，且新开发的低于常规 70 kV 的扫描电压也已应用于临床[5]。

低电压成像可在提高碘离子吸收率的同时大幅度降低电子的穿透能力，导致图像硬化伪影增高，从而增加图像噪声，故对于体型较大的患者，低电压扫描可增加图像噪声，影响图像质量[6]。由于儿童身体厚度小于成人，低电子的穿透力对小体型儿童的影响有限，早期有学者[7]尝试应用低电压扫描儿童，临床效果较好。应主要根据患者或患儿的体型选择适当电压，以年龄区分并不一定适合[8]。Nievelstein 等[9]建议儿童体部 CT 扫描方案以体质量为依据，使用不同的管电压，并建议对胸部、骨骼使用 80～100 kV 的低电压扫描。

1.3　IR 联合低电压技术的优势　IR 技术可有效降低低管电流导致的图像噪声，可大幅减低"低电压-高管电流"组合的辐射剂量，使"低电压-低管电流"方案可应用于临床，拓宽了低电压扫描的应用范围，目前已被广泛应用于儿童。研究[10]表明，MBIR 联合 3 种电压（80、100、120 kV），辐射剂量可由 2.88 mGy 降至 1.02 mGy，而图像质量仍然能够满足诊断要求，综合考虑图像硬化伪影、对比剂强化程度及图像边缘模糊效果，研究者认为 MBIR 联合 100 kV 为最佳扫描方式。另外如在颅面部、鼻窦的检查中，AIDR 联合管电压 80 kV、管电流 30 mAs 可保证重要解剖器官的显示程度[11]。在管电压 100 kV 和 80 kV 下，采用平均辐射剂量 1.2 mGy 的 SAFIRE 可达到 2.6 mGy 的 FBP 的噪声水平[12]。

IR 可降低由于低电压使电子的穿透力减弱而产生的噪声，IR 联合低电压扫描既可借助低电压扫描明显提高碘对比剂的 CT 值，又可应用 IR 的降噪能力来补偿低电压导致的噪声及伪影，尤其对于增强 CT 图像，可大幅度提高 CNR，凸显对比剂强化的显示能力。有研究[13]应用管电压 80 kV、辐射剂量 1.9 mGy 获得 CT 肺血管造影图像，通过全模型迭代算法重建，CNR 可由 4.4 提高至 32.6，从而很好地满足临床诊断要求。CNR 与目标组织强化程度呈正比，与图像噪声呈反比，上述研究力图降低图像噪声以提高 CNR。应用低电压提高对比剂浓度的特点来减少对比剂的浓度和用量，联合 IR 的降低噪声能力，稳定 CNR，以达到保护患者肾脏功能的目的。Nyman 等[14]应用低浓度对比剂（300 mgI/ml）联合低电压（80 kV）扫描急性肺栓塞患者，发现可达到常规浓度对比剂（350 mgI/ml）联合管电压 120 kV 的扫描强化效果。Knipp 等[15]为保护一组氮质血症患者的肾脏功能，尝试在腹盆腔 CTA 时将对比剂用量减半，通过 IR 联合低电压（80 kV）保证了强化效果，且控制了图像噪声。对于特殊的检查部位，也可应用 IR 联合低电压，以大幅度降低辐射剂量。一项研究[16]表明，采用 ASIR 联合低电压行 CT 尿路造影，辐射剂量降低了 44%，但图像质量未受影响。

新程序如智能电压选择技术、自动设置扫描电压程序有助于选择合适的扫描电压。研究[17]显示，对成人胸部行增强 CT 扫描时，采用智能电压选择技术（对 80%病例推荐管电压 100 kV），可在降低辐射剂量的同时增强对比剂 CT 值。另一项研究[18]中，腹部 CTA 采用自动设置扫描电压程序，对中小体模同样选择了较低的扫描电压（70～100 kV）。

2　IR 联合低电压技术在儿童中的应用

一组关于儿童的体模实验[7]指出，应用低电压提高对比剂 CT 值时，需要注意图像噪声以及 CNR 的变化，以满足图像质量；对于不同体型、不同检查目的，使用的合理电压也不相同。管电压 100～120 kV 较适合平扫；管电压 80～100 kV 适合增强或 CTA。有学者[19]对一组患儿行胸部 CTA 检查，发现采用 MBIR 联合低电压（80 kV）技术可降低辐射剂量，并大幅提高 CTA 的显示能力。IR 联合低电压技术应用于心脏大血管及冠状动脉也有报道。研究[20]发现 IR 联合低电压技术可用于诊断儿童复杂先天性心脏病，辐射剂量不仅可降低至 0.60 mSv，同时也可减少对比剂的使用量；研究[21]认为，管电压 70 kVp、辐射剂量

0.30 mSv也可用于评价儿童先天性心脏病。也有学者[22]评价儿童先天性心脏病时单独采用 70 kV 来减少对比剂用量,但图像噪声增高,需 IR 算法消除增高的噪声,以达到满意的图像质量。

在常用儿童腹部 CT 检查中,Kim 等[23]采用 IR 联合低电压技术,可在辐射剂量 2.9 mGy 水平获得满足诊断要求的图像。Wang 等[24]发现在儿童腹部 CT 检查中,采用 70% ASIR 联合低电压(80 kV)可使辐射剂量和对比剂使用量分别下降了 30%和 37%,提示大幅提高 IR 权重可减低儿童腹部 CT 检查时的辐射剂量和对比剂使用量。也有学者[25]发现,采用高级混合 IR 联合低电压(80~100 kV)不仅可以保证图像质量,并且可减低部分辐射伪影,并可清晰显示腹部外伤、转移病变。还有学者将低电压用于特殊疾病、特殊征象的针对性超低辐射剂量检查,如采用管电压 100 kV可在极低辐射剂量水平(0.14 mGy)观察到囊性纤维化患儿的支气管扩张等特征征象[26];也有学者[27]将管电压及管电流值降至最低观察儿童颅缝早闭的情况,辐射剂量可降至 0.1 mSv。

3 小结和展望

IR 算法通过降低图像噪声而推动了儿童低剂量 CT 应用工作的进展,也促进了低电压技术的应用。应用 IR 技术联合低电压扫描,在保证图像质量的前提下,可降低辐射剂量或对比剂用量。但 IR 联合低电压应用于儿童的方案尚无确定性证据,根据患儿的体型、检查目的调节电压,同时根据需要显示的组织结构来设定适宜的 IR 权重,可以更进一步降低辐射剂量,维持图像质量。

[参考文献]

[1] Martin CJ. Effective dose: Practice, purpose and pitfalls for nuclear medicine. J Radiol Prot, 2011,31(2):205-219.

[2] 张祺丰,彭芸,李剑颖,等.64 排螺旋 CT 自动管电流调节技术降低儿童胸部扫描剂量的应用研究.中国医学影像技术,2009,25(9):1591-1594.

[3] Holmquist F, Nyman U, Siemund R, et al. Impact of iterative reconstructions on image noise and low-contrast object detection in low kVp simulated abdominal CT: A phantom study. Acta radiol, 2016,57(9):1079-1088.

[4] Machida H, Fukui R, Tanaka I, et al. A method for selecting a protocol for routine body CT scan using gemstone spectral imaging with or without adaptive statistical iterative reconstruction: Phantom experiments. Jpn J Radiol, 2014, 32(4):217-223.

[5] Rompel O, Glöckler M, Janka R, et al. Third-generation dual-source 70-kVp chest CT angiography with advanced iterative reconstruction in young children: Image quality and radiation dose reduction. Pediatr Radiol, 2016,46(4):462-472.

[6] Yu L, Li H, Fletcher JG, et al. Automatic selection of tube potential for radiation dose reduction in CT: A general strategy. Med Phys, 2010,37(1):234-243.

[7] Herzog C, Mulvihill DM, Nguyen SA, et al. Pediatric cardiovascular CT angiography: Radiation dose reduction using automatic anatomic tube current modulation. AJR Am J Roentgenol, 2008,190(5):1232-1240.

[8] Kim MJ, Park CH, Choi SJ, et al. Multidetector computed tomography chest examinations with low-kilovoltage protocols in adults: Effect on image quality and radiation dose. J Comput Assist Tomogr, 2009,33(3):416-421.

[9] Nievelstein RA, Van Dam IM, Van der molen AJ. Multidetector CT in children: Current concepts and dose reduction strategies. Pediatr Radiol, 2010,40(8):1324-1344.

[10] Deák Z, Maertz F, Meurer F, et al. Submillisievert computed tomography of the chest using model-based iterative algorithm: Optimization of tube voltage with regard to patient size. J Comput Assist Tomogr, 2017,41(2):254-262.

[11] Schaafs LA, Lenk J, Hamm B, et al. Reducing the dose of CT of the paranasal sinuses: Potential of an iterative reconstruction algorithm. Dentomaxillofac Radiol, 2016,45(7):20160127.

[12] Pontana F, Pagniez J, Duhamel A, et al. Reduced dose low-voltage chest CT angiography with sinogram-affrmed iterative reconstruction versus standard-dose fltered back projection. Radiology, 2013,267(2):609-618.

[13] Laqmani A, Kurfuerst M, Butscheidt SA, et al. CT pulmonary angiography at reduced radiation exposure and contrast material volume using iterative model reconstruction and iDose (4) technique in comparison to FBP. PLoS One, 2016, 11(9):e0162429.

[14] Nyman U, Bjorkdahl P, Olsson ML, et al. Low-dose radiation with 80-kVp computed tomography to diagnose pulmonary embolism: A feasibility study. Acta radiol, 2012,53(9):1004-1013.

[15] Knipp D, Lane BF, Mitchell JW, et al. Computed tomographic angiography of the abdomen and pelvis in azotemic patients utilizing 80-kV(p) technique and reduced dose iodinated contrast: Comparison with routine 120-kV(p) technique. J Comput Assist Tomogr, 2017,41(1):141-147.

[16] Zhou Z, Chen H, Wei W, et al. Low kilovoltage peak (kVp) with an adaptive statistical iterative Reconstruction algorithm in computed tomography urography: Evaluation of image quality and radiation dose. Am J Transl Res, 2016,8(9):3883-3892.

[17] Li M, Feng S, Wu N, et al. Scout-based automated tube potential selection technique (kV assist) in enhanced chest computed tomography: Effects on radiation exposure and image quality. J Comput Assist Tomogr, 2017,41(3):442-445.

[18] Schindera ST, Winklehner A, Alkadhi H, et al. Effect of automatic tube voltage selection on image quality and radiation dose in abdominal CT angiography of various body sizes: A phantom study. Clin Radiol, 2013,68(2):e79-e86.
[19] 孙记航,于彤,段晓岷,等.基于模型的迭代重建算法优化低管电压儿童胸部 CTA 图像质量.中国医学影像技术,2015,31(2):302-305.
[20] Hou QR, Gao W, Sun AM, et al. A prospective evaluation of contrast and radiation dose and image quality in cardiac CT in children with complex congenital heart disease using low-concentration iodinated contrast agent and low tube voltage and current. Br J Radiol, 2017,90(170):20160669.
[21] Nie P, Li HO, Duan YH, et al. Impact of sinogram affirmed iterative reconstruction (SAFIRE) algorithm on image quality with 70 kVp-tube-voltage dual-source CT angiography in children with congenital heart disease. PLoS One, 2014,9(3):e91123.
[22] Nakagawa M, Ozawa Y, Sakurai K, et al. Image quality at low tube voltage (70 kV) and sinogram-affirmed iterative reconstruction for computed tomography in infants with congenital heart disease. Pediatr Radiol, 2015, 45(10): 1472-1479.
[23] Kim JH, Kim MJ, Kim HY, et al. Radiation dose reduction and image quality in pediatric abdominal CT with kVp and mAs modulation and an iterative reconstruction technique. Clin Imaging, 2014,38(5):710-714.
[24] Wang X, Zhong Y, Hu L, et al. A prospective evaluation of the contrast, radiation dose and image quality of contrast-enhanced CT scans of paediatric abdomens using a low-concentration iodinated contrast agent and low tube voltage combined with 70% ASIR algorithm. Int J Clin Pract. 2016,70(Suppl 9B): B16-B21.
[25] Berlin SC, Weinert DM, Vasavada PS, et al. Successful dose reduction using reduced tube voltage with hybrid iterative reconstruction in pediatric abdominal CT. AJR Am J Roentgenol, 2015,205(2):392-399.
[26] Mieville FA, Berteloot L, Grandjean AA, et al. Model-based iterative reconstruction in pediatric chest CT: Assessment of image quality in a prospective study of children with cystic fibrosis. Pediatr Radiol, 2013,43(5):558-567.
[27] Ernst CW, Hulstaert TL, Belsack D, et al. Dedicated sub 0.1 mSv 3DCT using MBIR in children with suspected craniosynostosis: Quality assessment. Eur Radiol, 2016,26(3): 892-899.