

低剂量CT技术发展及其临床应用

沈晓波^{1,2}, 聂生东¹

1. 上海理工大学医学影像工程研究所, 上海 200093; 2. 上海西门子医疗器械有限公司, 上海 201318

【摘要】CT成像技术在临床上具有不可替代的应用价值,但由于CT扫描对患者的辐射剂量较高,因此如何在保证CT图像质量的前提下,降低对患者的辐射剂量是近年来医学影像界关注的重点,也是CT成像技术发展的一个重要方向。近年来依赖于科学技术的迅猛发展,低剂量CT技术也是日新月异,其在临床上的应用也越来越广泛。本文首先概括了传统CT检查存在的普遍问题,随后概述低剂量CT技术的发展情况,再以西门子CT为例,引入解决这些问题的低剂量CT技术,并将西门子低剂量CT技术分成3类:曝光控制技术、双源技术、图像重建技术。分别阐述它们的工作原理,最后从5个方面(胸部、颅面部、心脏冠脉、腹部和头颅)对其在临床上的应用进行了讨论。

【关键词】计算机断层扫描技术;低剂量;双源;辐射剂量;图像重建技术;综述

【中图分类号】R814.2

【文献标识码】A

【文章编号】1005-202X(2016)03-0238-05

Development and clinical application of low dose computed tomography technology

SHEN Xiao-bo^{1,2}, NIE Sheng-dong¹

1. Institute of Medical Imaging Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Siemens Medical Equipments Ltd, Shanghai 201318, China

Abstract: Computed tomography (CT) imaging technology has irreplaceable value in clinical applications. But the CT scan has a higher radiation dose for patients. Recently, reducing radiation dose for patients without image quality compromise is a hot topic in medical imaging field and an important direction of CT imaging technology development. With the rapid development of science and technology, low dose CT technology develops quickly, having a wider and wider clinical application. The common problems of traditional CT examination and the developments of low dose CT technology were summarized in the paper. Based on Siemens CT, a low dose CT technology was introduced to solve the problems. The Siemens low dose CT was classified into exposure control technology, dual sources technology, and image reconstruction technology. The operating principle of each technology was introduced. And the clinical applications of low dose CT for thorax, craniofacial, coronary artery, abdomen and head were analyzed.

Key words: computed tomography scanning technology; low dose; dual sources; radiation dose; image reconstruction technology; review

前言

人类感知世界、了解物质内部结构的方法自从CT的出现而得到突破性进展,它是继伦琴发现X射线之后里程碑式的成就。CT自从1973年开始应用

于临床至今,它的临床应用越来越广,在常规体检、疾病筛查与诊断、手术前方案制定及术后疗效评估等方面发挥着越来越重要的作用。CT清晰的解剖学图像以及快捷的成像速度受到了广大临床医生的青睐,这也导致了CT检查数量的迅猛增长。据统计CT年检查频率仅占有放射学检查的3%,但是其辐射剂量却占到34%甚至更高^[1]。然而X线辐射会增加罹患疾病的可能性,现代研究已经表明1.5%~2%的肿瘤可能是由于CT的辐射剂量所致^[2]。比如当成人腹部检查有效剂量为10 mSv时,致癌风险就会增加1/2000^[3]。因此如何在保证甚至提高图像质量的同

【收稿日期】2015-10-11

【基金项目】国家自然科学基金(60972122);上海市教卫科研创新重点项目(14ZZ135)

【作者简介】沈晓波(1984-),男,上海人,硕士研究生。Tel: 18616772165; E-mail: shenxiaobohappy@126.com。

【通信作者】聂生东(1962-),男,山东泰安人,博士,教授,博士生导师。Tel: 021-55271172; E-mail: nsd4647@163.com

时降低剂量越来越受到医学影像学界的关注。低剂量CT技术应运而生,成为CT发展的热点及重要方向^[4]。低剂量CT技术最早是在1990年由Naidich等^[5]提出并使用在胸部检查中,但当时由于CT硬软件技术的限制,成像质量还无法满足临床诊断要求,而如今科学技术的高速发展为各种低剂量CT技术的实现奠定了基础。

1 传统CT检查存在的问题

X线辐射具有电离效应,对人体有害,所以放射检查中应该遵循ALARA原则^[6]。但传统CT检查普遍存在以下问题:(1)传统CT扫描参数无法根据不同体型的人进行自动调整优化。比如在对儿童进行CT检查时,若使用常规成人的扫描参数,由于儿童体型比成人瘦小很多,相同扫描条件下其接收的剂量较高,以头颈部为例,有效辐射剂量较成人高2~3倍,这将导致儿童患癌症的风险远高于成人^[7]。(2)传统CT扫描无法避免对敏感部位的直接照射,比如眼眶、鼻窦、中耳扫描无法避开晶状体,胸部扫描无法避开乳腺,盆腔扫描无法避开生殖系统,而性腺对射线极为敏感。(3)在冠状动脉CT检查中,传统CT采用回顾性心电门控结合小螺距的扫描方式,以保证心脏图像数据的连续性以及高信噪比,但小螺距的重叠扫描必然造成高辐射剂量。(4)传统CT的图像重建算法(Filtered Back Projection, FBP)对扫描剂量和数据完整性的要求很高,当扫描剂量降低或数据采集不完整时图像质量急剧下降,影响了医生的临床诊断。

2 低剂量CT技术发展概述及原理简介

X线辐射剂量和许多因素有关,比如管电流、管电压、螺距、扫描长度及时间等。低剂量CT技术的发展从最初简单地手动改变某些参数而达到降低剂量的目的,到随着科学技术的发展,上世纪90年代初出现了各种曝光控制技术,再到2005年开始依赖CT关键部件的重大革新,低剂量CT技术迎来了高速发展期,最后到近几年出现了以迭代重建技术为代表的新思路低剂量CT技术。下面将以西门子CT为例,曝光控制技术、双源技术、图像重建技术简述各种低剂量CT技术的原理。

2.1 曝光控制技术

2.1.1 四维自动实时剂量调节技术(CARE Dose4D)

CARE Dose4D可以在CT扫描过程中自动、实时

地调节球管电流,控制扫描剂量,旨在用最小的剂量得到满足诊断要求的图像,试验表明最高能减少66%的剂量^[8]。它的原理如下:实际应用中首先通过定位像来确定长轴向各位置的衰减量,根据其衰减分布在随后的螺旋扫描中调节球管电流,在衰减小的位置降低电流,高衰减区域提高电流。在胸部区域由于平均密度低,电流明显减低,但在肩膀以及靠近骨盆区域的组织平均密度高,相应电流提高;另外由于人体的体型特性,球管在侧位时(Lateral)的电流也明显高于前后位(Average),如图1所示。总之CARE Dose4D可以根据病人不同的体型(大小、胖瘦等)自动优化扫描参数,通过预先自定义参考管电流(Reference mAs)可以确保所有层面的图像质量保持一致,再根据以往的经验来确定最合适的扫描剂量。

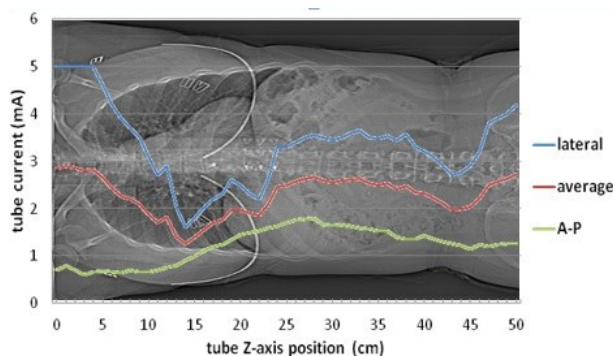


图1 球管在不同位置的管电流变化曲线

Fig.1 Tube current changing curve in different positions

2.1.2 CARE kV 技术 该技术是西门子所独有的技术,以Siemens第二代双源CT为例,根据患者的体型和检查类型可以在70~140 kV范围内自动选择合适的管电压,能在降低60%辐射剂量的同时增强图像的对比度,从而提高图像质量^[9],如图2和图3所示。它的工作原理如下:常用图像的信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)对比噪声比(Contrast Noise Ratio, CNR)来评价图像质量,当kV较低时,射线穿过人体衰减较多,所得图像的对比度提高,在保证图像质量CNR(或SNR)不变的前提下,可以允许噪声也相应提高。CARE kV技术在调整扫描参数时是以保证图像质量为前提的,因此不存在图像质量过差的顾虑。根据大量实验结果和临床经验所研发的智能CARE kV技术能从小到大自动调整kV,最终达到最小剂量的目的^[10]。

2.1.3 X-care技术 该技术同样是西门子的独有技术,首次实现选择性地屏蔽对辐射敏感器官的直接照

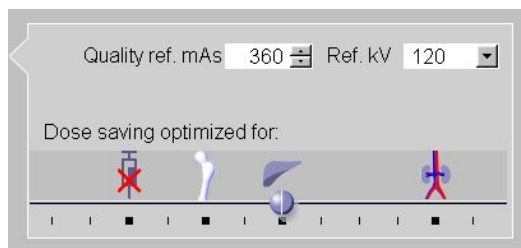


图2 根据不同检查类型优化管电压和电流

Fig.2 Optimizing tube voltage and current according to different types of examinations

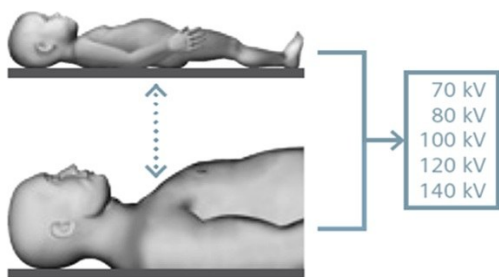


图3 根据患者体型调节管电压

Fig.3 Adjusting tube voltage according to patient size

射,可以在保证图像质量的前提下,保护好敏感器官。在应用 X-care 技术后,当球管旋转至敏感器官时,X线会自动被屏蔽而避免对敏感器官的直接照射,减少了辐射剂量,如图4所示。又如在CT引导介入穿刺检查中,当球管旋转至医生手部时,X线同样被自动屏蔽而避免直接照射手部,使辐射剂量明显降低,如图5所示。

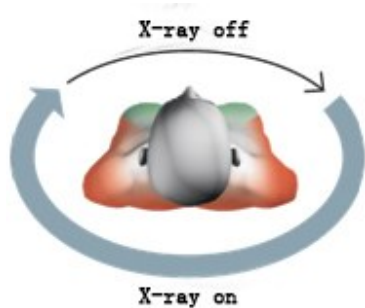


图4 自动屏蔽X射线保护敏感器官

Fig.4 X-ray auto-shielding for sensitive organ protection

2.2 双源技术

西门子在2005年发布了全球首款双源CT,创新的设计理念为临床应用带来了新的突破,堪称CT发展史上的又一里程碑。该系统配备了两套球管和探测器,它改变了常规一套球管和探测器的传统CT成像方式。通过呈90°交叉安置在机架上的两套球管

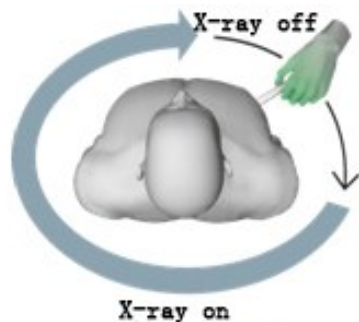


图5 自动屏蔽X射线保护手部

Fig.5 X-ray auto-shielding for hand protection

和探测器来采集数据,最高机架转速可达0.33 s/360°(心脏扫描时)^[11]。

双源CT拥有超快的扫描速度,不仅显著提高了心脏冠脉检查的质量和成功率,而且能降低50%的辐射剂量^[12]。这是因为:(1)具有非常高的时间分辨率,可以在任何心率下的1个心动周期内采集完整的心脏图像,扫描时间显著减少;(2)可以根据心率的快慢自动调节进床速度改变扫描的螺距,进一步减少扫描时间;(3)采用心电图的适应性剂量调控技术来降低心脏收缩期的辐射剂量。

2008年西门子推出了第二代双源CT,该系统拥有独特的炫速Flash扫描技术,可以在螺距3.4的情况下快速扫描各种部位,配合0.28 s的机架旋转速度,移床速度达485 mm/s。应用该扫描技术,几乎所有患者都能够在不屏气、不控制心率的前提下获得满足临床诊断的图像,显著减少患者的辐射剂量。

2.3 图像重建技术

通过软件手段如图像重建技术也同样可以降低辐射剂量。2009和2011年西门子先后推出了第一代基于图像域的迭代重建算法(Iterative Reconstruction in Image Space, IRIS)和第二代基于原始数据域的迭代重建算法(Sinogram Affirmed Iterative Reconstruction, SAFIRE)。SAFIRE是目前唯一一种基于原始数据域的CT图像迭代重建算法^[13],其与传统的FBP算法相比可以减少60%的剂量^[14],还能有效去除图像伪影而提高图像质量。该算法以IRIS为基础,在图像重建过程中引入两套迭代循环(如图6所示):计算机首先建立一个实际CT成像的模拟机,在原始数据域中将FBP重建的结果正投影到正弦测量数据,用来校正初始重建中出现的瑕疵和伪影,其差值作为模版会在下次FBP重建中使用,根据实际需要循环数次,随后将原始数据域所得结果应用于图像域中

再进行迭代校正以降低图像噪声,同样循环数次得到最终的图像。相比于IRIS,SAFIRE更大限度地利

用了原始数据所包含的信息,减少图像噪声和伪影而获取更为真实的图像。

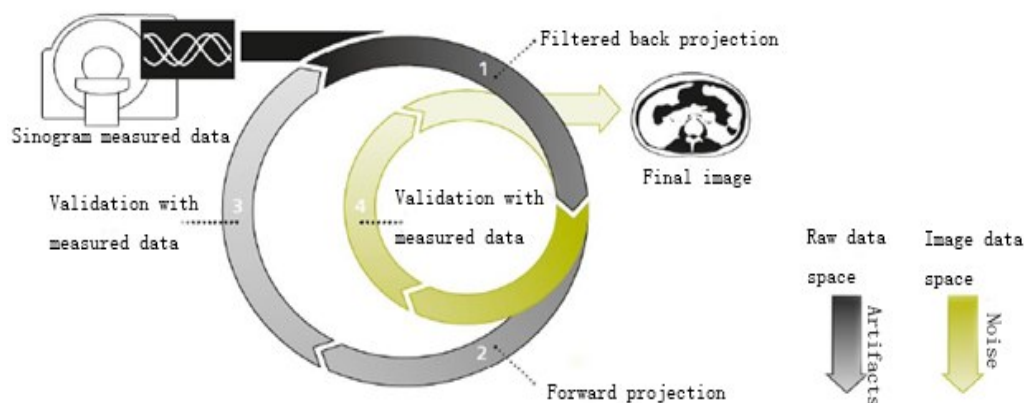


图6 SAFIRE 图像重建原理图

Fig.6 Image reconstruction schematic diagram of SAFIRE

SAFIRE: Sinogram affirmed iterative reconstruction

3 临床应用

低剂量技术近年来在临床上得到了充分地应用,尤其是在以下几个方面:

3.1 胸部检查

胸部检查现已是最常规的体检项目,以前基本都采用X线摄影检查,但常规X线摄影对肺内小结节的检出率明显低于CT检查,再加上低剂量CT技术在胸部检查上的广泛应用,X线胸部摄影正逐渐被CT取代。胸部中的组织如肺泡、肺实质、肺内病灶以及纵膈脂肪之间均有很高的自然对比度,而且整个胸部组织密度较小导致X线衰减程度轻,所以非常适合CT低剂量技术的应用。

在临床上多种低剂量技术可应用于胸部检查。比如通过CARE Dose4D技术,能够保证甚至提高图像质量的同时降低胸部扫描剂量^[15];CARE kV技术在胸部CTA中使用可以在保证图像噪声不增高的情况下,提高了图像信噪比,而放射剂量降低约25.3%^[10];Pontana等^[16]比较了32例病人胸部扫描SAFIRE重建和FBP重建图像的噪声,结果SAFIRE重建降噪显著,辐射剂量可降低35%。

3.2 颌面部检查

在颌面部检查中,晶状体和甲状腺等都属于射线敏感部位,如果接受到不必要甚至是过量射线照射时,其致癌的可能性会大幅提升。另外颌面部含有一系列含气的骨性腔隙,和肺部一样具有良好的自然对比度,所以该部位同样具备低剂量扫描的基

础,再加上该部位病变主要是以增生、肥厚及囊肿炎症为主,影像学表现与鼻腔、颅骨对比强,易于发现病灶。Bulla等^[17]结合IRIS迭代重建技术进行鼻窦区的低剂量扫描,研究表明在保证图像质量的前提下,可以使辐射剂量减少60%。Reimann等^[18]使用X-care技术减少敏感部位46%~59%的照射剂量,并且扫描剂量的减少并没有影响图像质量。

3.3 心脏冠脉检查

随着CT技术的发展,CT的时间分辨率和空间分辨率大大提升,尤其是双源CT的诞生,使CT冠脉血管造影成为筛查冠心病首选的非创伤性检查方法。双源CT不仅提高了心脏冠脉检查的图像质量,而且它的多项低剂量技术显著地减少了心脏冠脉检查的辐射剂量。比如大螺距Flash扫描技术大大减少了扫描时间,在维持图像质量不变的前提下,与传统螺旋CT相比扫描剂量可降低大约40%^[19]。Moscariello等^[13]研究发现在CT冠脉检查中降低50%的剂量,采用SAFIRE重建的图像比采用传统FBP重建的图像具有更低的噪声和略高的图像质量,有效剂量降低约40%。Hausleiter等^[20]研究发现采用ECG门控的管电流调制技术可减少25%的辐射剂量。Husmann等^[21]研究表明前瞻性心电门控技术与常规回顾性门控扫描相比辐射剂量可以降低80%,并且图像质量同样满足临床诊断要求。

3.4 腹部检查

腹部是肿瘤好发的部位。临床上经常使用腹部的多期扫描作为腹部疾病确诊及随访的常规检查手

段,患者所接受的辐射剂量较高,又由于腹部和盆腔脏器间密度差较小,组织自然对比不明显,传统CT腹部扫描中需要使用较高的剂量来保证图像质量,但通过使用CARE kV技术和SAFIRE重建技术后,依然可以显著降低腹部扫描剂量。Winklehner等^[22]对体质指数在同一水平的受检者进行腹部增强扫描,发现使用CARE kV技术可在图像背景噪声不增加和满足诊断要求的同时降低辐射剂量约25%。Hyun等^[23]研究表明联合CARE kV以及SAFIRE图像重建技术,可以在保证图像质量不变的前提下降低剂量41.3%。Schabel等^[24]在腹部血管增强扫描中运用SAFIRE重建技术,在保证图像质量的前提下减少50%的剂量。

3.5 头颅检查

头颅CT检查一直是所有CT检查中所占比例较高的,因为它具备了方便快捷,对新鲜脑出血高敏感性等特点。在扫描剂量方面,由于成人颅骨密度高,而颅脑中灰质和白质间的自然对比低,为了保证成像质量,过去扫描剂量都比较高,故低剂量技术在婴幼儿中应用较多^[25]。但在使用一些低剂量技术后,头颅扫描剂量也可以被整体降低。比如钟志勇等^[26]采用CARE Dose4D技术对100例常规头颅CT检查的研究表明,在保证图像质量的前提下降低了约30%剂量;卞佳等^[27]采用低剂量扫描结合SAFIRE重建对比常规扫描,结果图像质量在满足临床诊断的前提下剂量降低大约30%;付雨菲等^[28]通过降低管电压来降低扫描剂量,再结合SAFIRE技术重建,结果在保证图像质量的同时降低剂量18%。

4 结语

随着科学技术的不断发展,新的低剂量技术还会不断涌现,低剂量可在更多方面应用于临床。但是熟悉和掌握各种低剂量CT技术是顺利完成低剂量扫描的前提,这就需要放射科医生认识到与时俱进、终生学习的重要性。所以不管是CT厂商、放射学家,还是医院放射科工作人员应该齐心协力,在保证诊断要求的前提下将CT辐射剂量的伤害降到最低,更好地服务于广大患者。

【参考文献】

- [1] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation[R]. United Nations: Indiana University, 2000.
- [2] BRENNER D J, HALL E J. Computed tomography-an increasing source of radiation exposure[J]. N Engl J Med, 2007, 357(22):

2277-2284.

- [3] GOLDING S J, SHRIMPTON P C. Radiation dose in CTare we meeting the challenge[J]. Br J Radiol, 2002, 75: 1-4.
- [4] WANG G, YU H, DE MAN B. An outlook on X-ray CT research and development[J]. Med Phys, 2008, 35: 1051-1064.
- [5] NAIDICH D P, MARSHALL C, GRIBBIN C, et al. Low-dose CT of the lung: preliminary observation[J]. Radiology, 1990, 175: 729-731.
- [6] SLOVIS T L. ALARA conference proceedings: the ALARA concept in pediatric CT- intelligent dose reduction[J]. Pediatr Radiol, 2002, 32(4): 217-313.
- [7] BRENNER D J, ELLISTON C D, HALL E J, et al. Estimated risks of radiation-induced fatal cancer from pediatric CT[J]. Am J Roentgenol, 2001, 176(2): 289-296.
- [8] 徐晓东, 邵军明, 孔军. 西门子多排螺旋CT新技术[J]. CT理论与应用研究, 2006, 15(2): 22-27.
- XU X D, SHAO J M, KONG J. Siemens multi-slice CT new technologies[J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2006, 15(2): 22-27.
- [9] YU L, LI H, FLETCHER J G, et al. Automatic selection of tube potential for radiation dose reduction in CT: a general strategy[J]. Med Phys, 2010, 37(1): 234-243.
- [10] 徐卓东. CARE kV-智能最佳kV扫描技术-降低剂量的同时提高图像质量[J]. 中国医疗设备, 2012, 27(2): 120-123.
- XU Z D. CAREkV-intelligent optimal kV scanning technology: reducing X-ray dose and improving CT image quality synchronously[J]. China Medical Equipment, 2012, 27(2): 120-123.
- [11] FLOHR T G, MCCOLLOUGH C H, BRUDER H, et al. First performance evaluation of a dual-source CT(DSCT) system[J]. Eur Radiol, 2006, 16(2): 256-268.
- [12] MCCOLLOUGH C H, PRIMAK A N, SABA O, et al. Dose performance of a 64-channel dual-source CT scanner[J]. Radiology, 2007, 243(3): 775-784.
- [13] MOSCARELLO A, TAKX R A, SCHOEPP U J, et al. Coronary CT angiography: image quality, diagnostic accuracy, and potential for radiation dose reduction using a novel iterative image reconstruction technique-comparison with traditional filtered back projection[J]. Eur Radiol, 2011, 21(10): 2130-2138.
- [14] GRANT K, RAUPACH R. SAFIRE: sinogramaffirmed iterative reconstruction[J/OL]. www.usa.siemens.com/healthcare.
- [15] SÖDERBERG M, GUNNARSSON M. The effect of different adaptation strengths on image quality and radiation dose using Siemens care Dose 4D[J]. Radiat Prot Dosimetry, 2010, 139(1-3): 173-179.
- [16] PONTANA F, PAGNIEZ J, FLOHR T, et al. Chest computed tomography using iterative reconstruction vs filtered back projection (Part 1): evaluation of image noise reduction in 32 patients[J]. Eur Radiol, 2011, 21(3): 627-35.
- [17] BULLA S, BLANKE P, HASSEPASS F, et al. Reducing the radiation dose for low-dose CT of the paranasal sinuses using iterative reconstruction: feasibility and image quality[J]. Eur J Radiol, 2012, 81(9): 2246-2250.
- [18] REIMANN A J, DAVISON C, BJARNASON T. Organ-based computed tomographic (CT) radiation dose reduction to the lenses: impact on image quality for CT of the head[J]. Comput Assist Tomogr, 2012, 36(3): 334-338.
- [19] GHADRI J R, KÜEST S M, GOETTI R, et al. Image quality and radiation dose comparison of prospectively triggered low-dose

(下转247页)