

基于一种体模对CT能谱技术的质量检测

胡志¹,余晓镔¹,康立丽¹,杨绍洲²,陈宏文³,王凡³

1.南方医科大学生物医学工程学院,广东广州510515;2.南方医科大学中西医结合医院,广东广州510315;3.南方医科大学南方医院,广东广州510515

【摘要】目的:探讨CT能谱成像技术的质量检测方法。**方法:**采用自行制作的碘试剂原型体模在西门子force双源CT和GE Discovery CT750 CT上,运用常用头部条件进行能量扫描实验,然后用双方的后处理工作站上进行图像定量分析。**结果:**在临床常用的单能量模式下,得到两者在60、70、80 keV能谱图像,经过对比两者的CT值吻合,再通过能谱成像等功能软件如等效原子序数直方图、基质散点分布图和CT值随射线能量变化曲线图,实现对不同浓度的碘溶液进行区分和定量分析其碘基含量。**结论:**经过利用原型体模分别对西门子force双源CT和GE 750能谱CT进行一系列的能谱扫描实验,证明该体模检测CT能谱成像技术的质量是可行的。

【关键词】能谱CT;定量分析;体模;成像技术;碘;质量保证

【中图分类号】R318.6;R814.42

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2018)01-0054-06

Phantom-based quality testing for spectral computed tomography technology

HU Zhi¹, YU Xiao'e¹, KANG Lili¹, YANG Shaozhou², CHEN Hongwen³, WANG Fan³

1. School of Biomedical Engineering, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China; 2. TCM-Integrated Cancer Center of Southern Medical University, Guangzhou 510315, China; 3. Nanfang Hospital, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China

Abstract: Objective To discuss the quality testing method for spectral computed tomography (CT) technology. **Methods** Based on the conditions for head scan, we used a self-produced iodine reagent phantom to carry out energy scanning experiments on SIEMENS force dual-source CT and GE Discovery CT750 CT. The obtained images were quantitatively analyzed by the post-processing workstation of the two CT systems. **Results** In the single-energy mode, the spectral CT images under the energy of 60, 70 and 80 keV were obtained, and the obtained images on the two CT systems had agreement CT values. The iodine radical content in iodine solution with different concentrations was distinguished and quantitatively analyzed with the spectral imaging software such as equivalent atomic number matrix histogram, matrix scatter diagram and CT value-energy curves. **Conclusion** The energy scanning experiments using self-produced iodine reagent phantom on SIEMENS force dual-source CT and GE Discovery CT750 CT verify that using the proposed self-produced iodine reagent phantom for the quality assurance of spectral CT technology is feasible.

Keywords: spectral computed tomography; quantitative analysis; phantom; imaging technology; iodine; quality assurance

前言

CT的能谱成像技术是利用物质在不同能量级的X线照射通过时的衰减系数进行投影重建,转变为相应的图像。区别于常规CT扫描时,球管产生为混合能量的X射线,物质对不同能量级X射线的吸收具有选择性,

穿过物质后,高能级的X射线通常多于低能级的X射线,低能级的X射线会被受到扫描的物质吸收得更多,因此具有混合能量的X射线通过物体后就被硬化了,这就是常说的“硬化效应”。我们可以这样理解,常规CT扫描时获得图像的“CT值”并不是准确的CT值,而是这种混合X射线的平均CT值,所以,这个“CT值”常常会影响临床应用上的各种定量分析诊断^[1]。能谱成像技术把传统CT扫描技术引入到能量CT的发展领域,与传统CT相比,能谱CT可以提供更多的成像参数和功能成像,从而获得更精准的临床图像^[1]。

1 目的与方法

【收稿日期】2017-10-22

【基金项目】广东省科技计划项目(2015A030401038)

【作者简介】胡志,高级工程师,研究方向:大型医疗影像设备的维修、质控管理,E-mail: 103610132@qq.com

【通信作者】余晓镔,教授,研究方向:医学物理学、大型医疗设备质量保证,E-mail: 877057376@qq.com

1.1 目的

近年来能谱CT在影像学诊断中已经开始普及使用,但目前非常缺乏一套评价使用中的能谱CT图像性能是否符合使用标准的检测技术。因此,基于能谱成像的原理,能够快速、客观、全面、准确地评价能谱CT的图像性能质量的检测技术是亟需解决的关键性问题^[2]。能谱CT的图像质量合格与否主要依靠以下几个性能参数:物质定量分析能力、单能量图像(去硬化、去金属伪影)、能谱曲线、有效原子序数和能谱图像分析工具等^[1-3]。能谱CT成像的优势在于能够获得基物质密度值及其分布图像,还能获得不同keV水平下的单能量图像,可以显示人体组织和病变部位随X线能量水平(keV)的变化衰减系数,从而产生反映人体组织和不同病变部位的能谱曲线,同时根据所得的能谱曲线计算出该组织和病变部位的有效原子序数(Effective-Z)^[1-6]。根据能谱定量分析的原理,我们选择碘和水作为基物质,设计一个可自由添加多种浓度碘溶液试管的原型体模尝试评价能谱CT的图像质量^[3-8]。本研究挑选了西门子公司最新双源CT(型号:SOMATOM Definition Force)和GE公司的宝石能谱CT(型号:Discovery CT750)两种临床最具有代表性的能谱CT进行定量分析实验。

1.2 方法

原型体模为亚克力材料(有机玻璃)制作的空心圆柱体,高195 mm,外径200 mm,内径194 mm,内部分别放置两层32孔亚克力圆形试管架,圆形试管架的内径为194 mm,两个试管架的32个圆孔垂直对应,试管架通过亚克力粘合剂与圆柱体底部和内壁固定。32个圆孔的孔径相同,均为20 mm,可分别放置31个规格为外径20 mm、长160 mm、容量30 mL的亚克力试管。根据实验要求,我们在实验室配制了多个0.5、0.8、1.0、2.0、5.0、10.0、12.0、20.0、30.0、50.0、100.0(mgI/mL)的碘溶液试管进行封装,另外添加一个纯净电离水(HU接近标准值0)的试管。

1.2.1 碘溶液配制办法 (1)用浓度为320 mgI/mL的非离子型X线造影剂碘帕醇为基准原材料;(2)用量杯装盛一定量(<20 mL)的纯净电离水,用实验移液器等精准器材分别加入适量碘帕醇320造影剂,并保持量杯的溶液总量为30 mL;(3)把配置好的碘溶液封装到实验试管里面。

具体稀释配置方法遵循溶液中碘的质量守恒,方程式为: $X=ab/c$,其中a为拟配置的碘溶液浓度;b为固定容量30 mL;c为基准配置碘溶液320 mgI/mL;X为拟添加320 mgI/mL的碘溶液容量(表1)。

该模体的优点在于,可以随时根据实验需要添

表1 不同浓度的碘试管配置关系

Tab.1 Configuration of different concentrations of iodine in test tube

Iodine concentration (mgI/mL)	X/mL	a/mgI · mL ⁻¹
0.5	0.046 875	0.5
0.8	0.075 000	0.8
1.0	0.093 750	1.0
2.0	0.187 500	2.0
5.0	0.468 750	5.0
10.0	0.937 500	10.0
12.0	1.125 000	12.0
20.0	1.875 000	20.0
30.0	2.812 500	30.0
50.0	4.687 500	50.0
100.0	9.375 000	100.0

加碘试管和调换碘试管的位置。这次实验,碘试管在模体中位置如图1所示,目的是可以直观地看到随着碘溶液浓度增加,在管电压增加时可以直观地看出碘溶液的CT值变化。另外,可以测试不同浓度的碘溶液在静止或运动时碘含量的定量分析。另外,在设计能谱去除金属伪影实验时,可以随时加入不锈钢钉模拟骨钉。

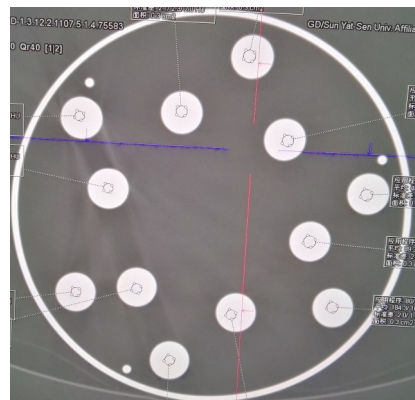


图1 force 的单能量图像

Fig.1 Single-energy image of SIEMENS force dual-source CT

1.2.2 能谱CT扫描方案和参数 (1)采用西门子公司最新推出的双源CT(SOMATOM Definition Force)对体模进行能量扫描,采用头部条件,扫描条件如下:A球管管电压值为80 kVp, Eff.mAs为221;B球管的电压值为140 kVp, Eff.mAs为221;FOV=250 mm,层厚为5 mm,层间距为5 mm;扫描序列选用A+B+M,球管旋转速度为0.5 s/r^[9-11]。

(2)采用GE公司最新型号的宝石CT(Discovery 750HD)对原型体模继续进行定量分析实验,扫描条件如下:单源瞬时kVp切换能谱CT进行扫描;FOV=25 cm,层厚为5 mm,层间距为5 mm,螺距为1.375:1,球管旋转速度为0.5 s/r;采用能谱采集扫描模式(管电压为80 kVp/140 kVp管电压瞬时切换);毫安自动设置为630 mA。

(3)实验图像利用各自的能量分析软件处理,在图像中,我们选定相同层面,选择相同大小的感兴趣区(Regions of Interest, ROI),ROI=20 mm²,测量其CT值,对于同一试管,测量5次,取平均值作为该浓度碘溶液的CT值。本次实验只选取60、70、80 keV这3个临床常用的能量模式进行实验讨论^[12]。

1.3 统计学方法

采用SPSS 17.0统计软件进行分析,用线性回归分析碘浓度与CT值之间的关系, $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 西门子force实验结果

根据西门子force的能谱实验,扫描完毕后,剂量报告显示,轴向扫描剂量指数CTDIvol(16 cm)为

25.32 mGy, DLP:409.3 mGy*cm,说明force的双能量扫描的辐射剂量不高。扫描得到80和140 kVp下混合能量的图像后,将数据传入WorkSpace工作站中,利用Monoenergetic软件可以重建出(40~190) keV共159个单能量图像(图1)。50 mgI/mL以上的碘溶液试管在80和140 kVp时,CT值已经达到1 000 HU,超过通常临床使用的CT值范围(-1 000~+1 000 HU),所以不予进行统计学分析。

(1)由表2和图2可见,在所受辐射剂量相同的情况下,测量得到80和140 kVp常规混合能量扫描下各个不同碘含量试管的CT值均随着碘浓度的升高,CT值升高;同一试管的CT值随着混合能量的增大而减小。各单能量图像,不同碘含量试管的CT值同样随着碘浓度的升高,CT值升高;同一试管的CT值随着单能量的增大而减小。(2)由表2对比可见,80 kVp和60 keV下,碘溶液所对应CT值相近;140 kVp和80 keV下,碘溶液的CT值相近。(3)由图2可以看到,混合能量80、140 kVp和单能量60、80 keV扫描时的CT值与碘浓度线性关系的表现:混合能量扫描得到的斜率与其相对应的单能量keV能谱成像的斜率非常接近,但混合能量80、140 kVp的CT值与碘浓度没有成线性关系。

表2 西门子force在各扫描模式不同碘浓度溶液的CT值(HU, $\bar{x} \pm s$)

Tab.2 CT value of iodine solution with different concentrations on SIEMENS force CT (HU, Mean \pm SD)

Energy	Iodine concentrations (mgI/mL)									
	0.0	0.5	0.8	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0	30.0	50.0
80 kVp	-1.7 \pm 2.2	16.6 \pm 1.9	32.3 \pm 32.3	40.6 \pm 2.3	89.8 \pm 3.0	184.2 \pm 2.1	369.4 \pm 2.1	732.8 \pm 3.0	1 152.8 \pm 3.1	1 979.1 \pm 4.6
140 kVp	-0.3 \pm 2.4	8.3 \pm 2.3	17.0 \pm 2.3	21.5 \pm 2.1	47.5 \pm 1.7	108.6 \pm 1.4	204.0 \pm 1.8	403.0 \pm 3.3	627.9 \pm 2.2	1 058.5 \pm 3.1
60 keV	-1.4 \pm 1.8	14.7 \pm 1.8	29.0 \pm 1.6	36.5 \pm 2.0	80.8 \pm 2.5	167.9 \pm 1.7	325.9 \pm 1.9	661.8 \pm 2.8	1 039.6 \pm 2.8	-
70 keV	-0.7 \pm 2.1	10.0 \pm 2.0	20.4 \pm 2.0	25.8 \pm 2.0	56.9 \pm 1.6	125.3 \pm 1.2	238.3 \pm 1.7	475.8 \pm 3.0	743.9 \pm 2.0	-
80 keV	-0.1 \pm 2.6	7.0 \pm 2.5	14.8 \pm 2.5	18.8 \pm 2.4	41.6 \pm 2.0	98.0 \pm 1.7	182.2 \pm 1.9	356.7 \pm 3.6	554.4 \pm 2.5	-

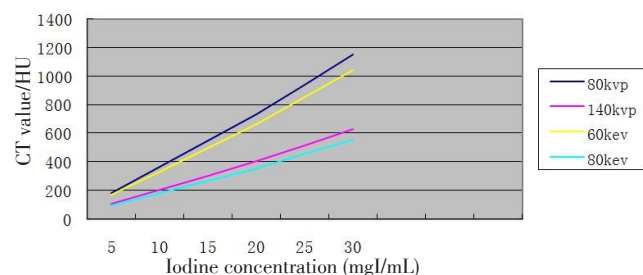


图2 西门子force CT混合能量和单能量下各种浓度碘溶液的CT值变化关系

Fig.2 Variations of CT value of iodine solution with different concentrations under mixed-energy and single-energy of SIEMENS force CT

2.2 GE 750实验结果

根据GE 750HD CT的能谱实验,剂量报告显示,轴向扫描和GSI扫描的剂量指数CTDIvol分别为55.90和38.42 mGy,反映GSI扫描的辐射剂量同样相对较低。GSI Viewer软件进行单能量图像重建,可得到40~140 keV共101个单能量图像(图3),通过GSI分析模块分别获取各浓度的碘溶液试管的能谱曲线图(图4)、散点图(图5)和等效原子序数直方图(图6)。

(1)从图4能谱曲线的趋势结果可见,由于50 mgI/mL以上的碘溶液试管CT值曲线在40 keV时,CT值已经达到3 000 HU,其它浓度的碘溶液试管CT值在

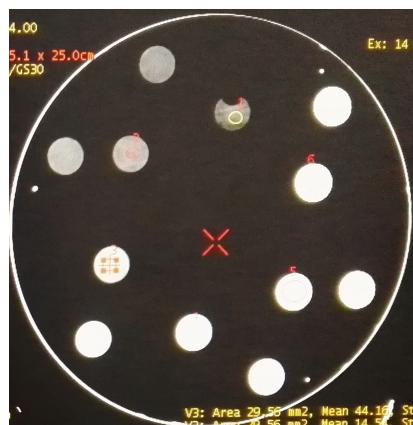


图3 GE 750在70 keV单能量下的图像

Fig.3 Image of GE 750 under single energy of 70 keV

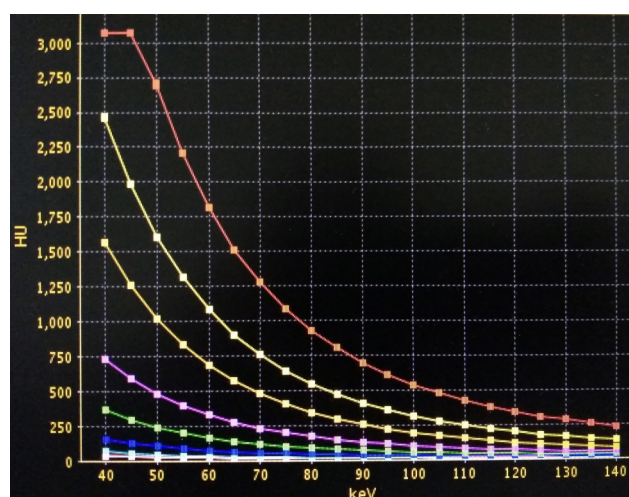


图4 GE 750的能谱曲线图

Fig.4 Energy spectrum curve of GE 750

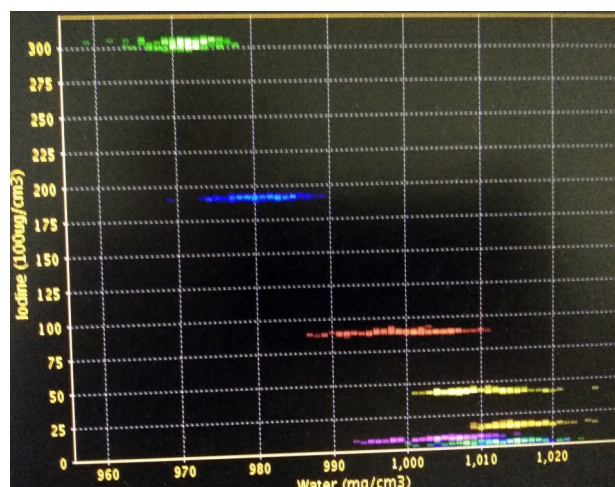


图5 GE 750的GSI碘基、水基散点图

Fig.5 GSI iodine-based and water-based scatter diagram of GE 750

40~60 keV 范围内同样超过了日常临床使用的CT值上限(-1 000~+1 000 HU),所以不予进行统计学分析。本

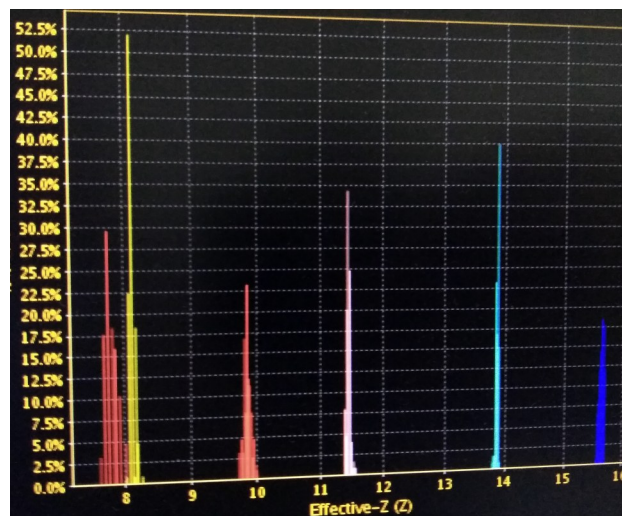


图6 GE 750的等效原子序数直方图

Fig.6 Equivalent atomic number histogram of GE 750

次实验我们选择了0.0、0.5、0.8、1.0、2.0、5.0、10.0、20.0、30.0 mgI/mL碘溶液试管在60~80 keV的单能量图像进行实验数据采集分析(表3),分别测量碘溶液试管的CT值和标准差。(2)从计算物质的等效原子序数、分析水基和碘基含量、CT值随X射线能量变化的谱线图3个角度,GE 750HD CT的GSI成像都能够准确区分不同碘含量的溶液。从图4的能谱曲线变化趋势,我们可以看到相同keV下,随着碘浓度的升高,CT值随之升高;相同浓度试管中,随着keV单能量的升高,CT值呈下降趋势,不同试管的CT值变化趋势曲线随着keV的增加而减小。(3)从图5的散点图碘基分析中,我们可以清晰看到由上到下得到的300、190、90、46、17、9、7、5、0(100 µg/cm³)的碘基含量数值和标称值30.0、20.0、10.0、5.0、2.0、1.0、0.8、0.5、0.0(mgI/mL)非常相近,从另一方面证明原型模体碘溶液试管的浓度配制得相当准确。(4)从图6等效原子序数直方图可见,水的波峰分别位于7.8,接近水的等效原子序数的真实值7.4。

从表4可知,这两款能谱CT在临床最常用的单能量模式70 keV下对于原型体模的碘溶液CT值检测结果非常接近,两组CT值数据均能精确地反映碘溶液物质密度的变化。

3 讨论

经过以上能谱实验,我们可证实,能谱成像技术和常规CT区别:常规CT扫描时,球管发出的混合能量X射线穿过扫描物质后,低能量的X射线通常会被扫描的物质吸收得更多,因此穿透扫描物质后的高能量X射线通常多于低能量X射线,所以高能量的X射线通常会影响衰减系数,这就是常说的“硬化效应”^[1]。由图2可知,

表3 单能量扫描下不同碘浓度溶液的CT值(GE 750)(HU, $\bar{x} \pm s$)Tab.3 CT value of iodine solution with different concentrations under single-energy scanning (GE 750) (HU, $Mean \pm SD$)

Energy/keV	Iodine concentrations (mgI/mL)								
	0.0	0.5	0.8	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0	30.0
60	-13.07 \pm 4.00	9.30 \pm 2.50	13.29 \pm 4.80	38.30 \pm 2.20	56.80 \pm 3.80	152.00 \pm 3.60	294.40 \pm 2.80	581.80 \pm 9.00	850.30 \pm 5.50
70	-1.72 \pm 3.90	8.30 \pm 2.50	12.42 \pm 2.70	24.30 \pm 2.50	46.44 \pm 2.60	118.02 \pm 3.20	223.81 \pm 2.90	456.16 \pm 4.00	720.30 \pm 4.50
80	3.07 \pm 5.58	6.70 \pm 1.80	14.54 \pm 2.10	17.72 \pm 3.90	44.16 \pm 1.60	95.70 \pm 3.90	180.32 \pm 2.10	357.80 \pm 4.30	540.72 \pm 4.90

表4 GE 750 能谱CT和西门子force 双源CT 70 keV下各种碘溶液的CT值(HU, $\bar{x} \pm s$)Tab.4 CT values of iodine solutions under 70 keV on GE 750 spectral CT and SIEMENS force dual-source CT (HU, $Mean \pm SD$)

CT systems	Iodine concentrations (mgI/mL)								
	0.0	0.5	0.8	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0	30.0
GE 750 spectral CT	-1.72 \pm 3.90	8.30 \pm 2.50	12.40 \pm 2.20	24.30 \pm 2.50	46.44 \pm 2.60	118.02 \pm 3.20	223.81 \pm 2.90	456.10 \pm 4.00	720.30 \pm 4.50
SIEMENS force dual-source CT	-0.7 \pm 2.1	10.0 \pm 2.0	20.4 \pm 2.0	25.8 \pm 2.0	56.9 \pm 1.6	125.3 \pm 1.2	238.3 \pm 1.7	475.8 \pm 3.0	743.9 \pm 2.0

80、140 kVp 混合能量扫描得到的斜率与其相对应的单能量 60、80 keV 能谱成像的斜率非常接近,但混合能量没有成线性关系,证明硬化效应等因数影响了混合能量的常规CT扫描;而能谱技术的单能量图像则表现出非常好的线性关系,斜率几乎不受到影响,保持了一致性,证明能谱技术成像不容易受到硬化效应等因数的影响。经过进一步 SPSS 统计学软件的计算结果表明,各组能谱所测得CT值与碘浓度之间均成明显线性关系。由此可见,混合能量的常规CT扫描无法进行精准的定量分析诊断,而且其CT值与浓度(如碘浓度)呈非线性关系,因此只有相对CT值的意义。而能谱成像技术可以很容易得到(mg/mL)的定量结果,其CT值也具有绝对意义,可进行准确的定量分析诊断。

从GE 750HD CT的能谱扫描实验再次印证了能谱成像技术对于定量分析诊断的准确性。从计算被扫描物质的组织和结构等效原子序数、水基和碘基含量、CT值随X射线能量变化的能谱曲线图3个角度,GE 750的GSI成像都能够准确区分不同碘含量的溶液。从另一方面证明原型模体碘溶液试管的浓度配制得相当准确。从表4可知,这两款能谱CT在临床最常用的单能量模式70 keV下对于原型体模的碘溶液CT值检测结果非常接近,两组CT值数据均能精确地反映碘溶液物质密度的变化。由此我们可以证明精确配置不同浓度的碘溶液体模适合评价能谱CT设备的图像质量^[13-18]。

我国现行的CT检测标准《X射线计算机断层摄影装置质量保证检测规范》(GB17589-2011),该标准适用

于CT机的验收、使用中的状态和稳定性检测。常规CT检测的内容主要有以下几个方面:CT剂量指数、定位光的精度、CT值(水)、噪声和均匀性、层厚、空间分辨率、高对比分辨率、低对比可探测能力、CT值的线性等。但是能谱CT的新功能(如:物质定量分析、去除金属伪影、能谱曲线分析等)并没有纳入CT质量检测标准当中^[19]。能谱CT的验收、使用、稳定性检测依然是按照传统CT检测的方法进行,因此根本不能满足能谱CT设备的发展需求,无法对能谱技术的图像质量进行有效的跟踪和评价。另外,导致能谱CT图像质量无法进行有效评价的最主要问题是缺乏一种与能谱技术相对应功能参数的标准检测体模。目前常用的功能检测体模(如美国PMI公司生产的Catphan 500体模等)都是为了按照普通CT的检测参数来设计,缺乏针对能谱CT的功能参数和动态参数(包括伪影)的检测项目。因此,本文设计和开发了一种适合能谱CT检测使用的原型体模对于研究适用于能谱CT图像质量评价的检测技术具有相当重要的意义。

4 结 论

经过原型体模分别对西门子force 双源CT和GE 750能谱CT的能谱实验,我们可以看到两款CT通过能谱功能扫描都能准确地进行碘溶液定量分析实验,得到各种碘溶液的CT值。从另一角度来看,本次实验的原型模体非常适合对CT的能谱技术成像进行图像质量检测。与常规混合能量模式下扫描所测得的CT值相比较,能谱CT扫描得到的单能量

CT值与碘浓度的相关性更高,而且CT值误差更小,更能反映碘浓度的真实情况。结合临床工作,能谱技术成像可以消除硬化伪影,准确反映出病灶有无强化及强化程度,比普通混合能量扫描更准确。能谱技术可以进行各种疾病的定量分析,如:常规CT无法显示肺实质血流灌注的分布状态,而CT能谱成像碘基图像可以有效反映肺实质血流动力学的变化,可同时提供解剖和功能信息;CT能谱成像肺组织碘定量分析还可作为肺栓塞疗效评估的客观指标;能谱技术可以用于评估肝硬化门静脉高压的程度,也可用于评估不同病变阶段的肝脏结节的动静脉血流比例从而预测其是否发生恶变等^[1,5]。因此能谱成像技术对于临床精确诊断具有非常重要的意义。

【参考文献】

- [1] 陈克敏. 能谱CT的基本原理与临床应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
CHEN K M. Principles and clinical applications of spectral CT imaging[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [2] 杨克桧, 余晓镔. 一种基于原型体模的宝石能谱CT成像的质量保证检测方法[J]. 实用放射学杂志, 2015, 31(1): 128-130.
YANG K C, YU X E. A quality assurance testing method for CT gemstone spectral imaging based on a phantom prototype[J]. Journal of Practical Radiology, 2015, 31(1): 128-130.
- [3] 王乐, 刘斌, 汪洁, 等. 能谱CT对碘含量测量准确性的实验研究[J]. 放射学实践, 2012, 27(3): 264-267.
WANG L, LIU B, WANG J, et al. Can gemstone spectral imaging accurately determine iodine concentration (a phantom study) [J]. Radiologic Practice, 2012, 27(3): 264-267.
- [4] 林晓珠, 沈云, 陈克敏. CT能谱成像的基本原理与临床应用研究进展[J]. 中华放射学杂志, 2011, 45(8): 798-800.
LIN X Z, SHEN Y, CHEN K M. Basic principles and clinical applications of CT spectroscopy[J]. Chinese Journal of Radiology, 2011, 45(8): 798-800.
- [5] LI X, ZHAO R, LIU B, et al. Gemstone spectral imaging dual-energy computed tomography: a novel technique to determine urinary stone composition[J]. Urology, 2013, 81(4): 727-730.
- [6] LEE S H, HUR J, KIM Y J, et al. Additional value of dual-energy CT to differentiate between benign and malignant mediastinal tumors: an initial experience[J]. Eur J Radiol, 2013, 82(11): 2043-2049.
- [7] DENG K, LI W, WANG J J, et al. The pilot study of dual-energy CT gemstone spectral imaging on the image quality of hand tendons[J]. Clin Imaging, 2013, 37(5): 930-933.
- [8] KARCAALTINCABA M, AKTAS A. Dual-energy CT revisited with multidetector CT: review of principles and clinical applications[J]. Diagn Interv Radiol, 2011, 17(3): 181-194.
- [9] 郝佳, 张丽, 邢宇翔, 等. 双能量CT技术在电子密度测量中的应用[J]. 核电子学与探测技术, 2011, 31(10): 735-741.
HAO J, ZHANG L, XING Y X, et al. The application of dual-energy CT technique in electron density measurement[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2011, 31(10): 735-741.
- [10] 梁德志, 朱迪, 刘远健, 等. 能谱CT测定甲状腺组织碘含量的临床研究[J]. 中华解剖与临床杂志, 2014, 19(1): 33-36.
LIANG D Z, ZHU D, LIU Y J, et al. Clinical study on thyroid iodine concentration with gemstone spectral CT [J]. Chinese Journal of Anatomy and Clinics, 2014, 19(1): 33-36.
- [11] 金梅, 刘力, 林奕军, 等. 双源CT碘图与能谱曲线技术在甲状腺结节鉴别诊断中的应用[J]. 医学影像学杂志, 2016, 26(12): 2203-2207.
JIN M, LIU L, LIN Y J, et al. Application of dual-source CT iodine map and energy spectrum curve technique in differential diagnosis of thyroid nodule [J]. Journal of Medical Imaging, 2016, 26(12): 2203-2207.
- [12] 田彤彤, 叶靖, 彭铮堃, 等. 低剂量能谱CT结合ASIR重建对肺部炎性肿块与周围型肺癌的鉴别诊断价值[J]. 实用医学杂志, 2017, 33(16): 2769-2772.
TIAN T T, YE J, PENG Z K, et al. The application research of low-dose spectral CT imaging combined with ASIR reconstruction in differentiating peripheral lung cancer from inflammatory mass [J]. The Journal of Practical Medicine, 2017, 33(16): 2769-2772.
- [13] 刘金有, 郝丽丽, 蒋琅琅, 等. 宝石能谱CT技术特点及临床应用价值[J]. 实用医技杂志, 2015, 22(7): 735-737.
LIU J Y, HAO L L, JIANG L L, et al. CT characteristics and clinical application value of gemstone energy spectrum [J]. Journal of Practical Medical Techniques, 2015, 22(7): 735-737.
- [14] 刘铁, 王健. 能谱CT成像碘基图的临床应用研究[J]. 现代医用影像学, 2015, 24(4): 532-534.
LIU T, WANG J. Progress and clinical application of iodine-based material decomposition image of spectral CT imaging [J]. Modern Medical Imagology, 2015, 24(4): 532-534.
- [15] 段海峰, 贾永军, 于勇, 等. 能谱CT碘基图在鉴别中央型肺癌与继发阻塞性肺炎变中的价值[J]. 实用放射学杂志, 2016, 32(2): 204-207.
DUAN H F, JIA Y J, YU Y, et al. Differentiation of central lung cancer from obstructive pneumonia and atelectasis using spectral CT iodine-based material decomposition technique [J]. Journal of Practical Radiology, 2016, 32(2): 204-207.
- [16] 贾永军, 贺太平. 宝石能谱CT临床应用及研究进展[J]. 实用放射学杂志, 2016, 32(5): 799-801.
JIA Y J, HE T P. Clinical application and research progress of CT gemstone spectral imaging [J]. Journal of Practical Radiology, 2016, 32(5): 799-801.
- [17] 韩文艳. CT能谱成像的基本原理与临床应用优势[J]. 中国医疗设备, 2015, 30(12): 90-91.
HAN W Y. Basic principle and advantages of clinical application of CT energy spectrum imaging [J]. China Medical Devices, 2015, 30(12): 90-91.
- [18] 刘磊, 李泉林, 浦仁旺, 等. 能谱CT个体化对比剂用量和低辐射剂量单能量CTU成像的临床应用价值[J]. 中国临床医学影像杂志, 2015, 26(7): 498-501.
LIU L, LI Q L, PU R W, et al. Clinical value of individual contrast dosage and low radiation dose CTU with monochromatic imaging in spectral CT [J]. Journal of China Clinic Medical Imaging, 2015, 26(7): 498-501.
- [19] OGATA T, UEGUCHI T, YAGI M, et al. Feasibility and accuracy of relative electron density determined by virtual monochromatic CT value subtraction at two different energies using the gemstone spectral imaging [J]. Radiat Oncol, 2013, 8(1): 83.

(编辑: 陈丽霞)