

## 能谱CT成像中扫描参数的优化

盖立平<sup>1</sup>, 刘爱连<sup>2</sup>, 刘义军<sup>2</sup>, 孙美玉<sup>2</sup>, 刘静红<sup>2</sup>, 浦仁旺<sup>2</sup>, 孙芹敏<sup>2</sup>, 鞠 焱<sup>2</sup>, 田士峰<sup>2</sup>, 李 焱<sup>2</sup>, 王 礼<sup>1</sup>, 丁晓东<sup>1</sup>, 王桂莲<sup>1</sup>, 孙福伯<sup>1</sup>

1. 大连医科大学物理教研室, 辽宁 大连 116044; 2. 大连医科大学附属第一医院放射科, 辽宁 大连 116011

**【摘要】目的:**探讨能谱CT不同扫描参数对测量结果的影响, 优化最佳扫描参数。**方法:**采用GE公司标准水膜, 5个扫描参数有序组合, 测量552组数据, 水膜上选取10个测量点测量CT值, 利用概率统计分析法, 优化扫描参数。**结果:**能谱CT水膜成像的扫描参数对测量结果有显著影响, 不同参数影响效果不同, 不同测量位置对测量结果也有影响。**结论:**通过能谱CT扫描参数的理论模型和实验数据结合分析, 可以优化扫描参数, 对临床诊断结果提供可靠的分析依据。

**【关键词】**能谱成像; 水膜; 参数优化; 多元回归分析

**【中图分类号】**R812

**【文献标识码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2015)05-0664-05

## Optimization of scanning parameters in spectral CT imaging

GAI Li-ping<sup>1</sup>, LIU Ai-lian<sup>2</sup>, LIU Yi-jun<sup>2</sup>, SUN Mei-yu<sup>2</sup>, LIU Jing-hong<sup>2</sup>, PU Ren-wang<sup>2</sup>, SUN Qin-min<sup>2</sup>, JU Ye<sup>2</sup>, TIAN Shi-feng<sup>2</sup>, LI Ye<sup>2</sup>, WANG Li<sup>1</sup>, DING Xiao-dong<sup>1</sup>, WANG Gui-lian<sup>1</sup>, SUN Fu-bo<sup>1</sup>

1. Department of Physics, Dalian Medical University, Dalian 116044, China; 2. Department of Radiology, First Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Dalian 116011, China

**Abstract: Objective** To investigate the effect of different scanning parameters in spectral CT on measurement results, and optimize the best scanning parameters. **Methods** The GE standard water model was applied to orderly combine 5 scanning parameters, and measure 552 groups of data. Ten measurement points on water model were selected to measure CT values, and the probability and statistics analysis was applied to optimize the scanning parameters. **Results** The scanning parameters of spectrum CT water model imaging had remarkable effects on measurement results. Different parameters had different effects on results. And the different measurement points also affected measurement results. **Conclusion** By analyzing the theoretical model and experimental data of spectral CT scanning parameters, the scanning parameters can be optimized to provide the reliable analytic basis for the clinical diagnosis results.

**Key words:** spectral imaging; water model; parameters optimization; multiple regression analysis

### 前言

在CT成像系统中,扫描参数的选择往往过分依赖机器本身。实际测量中扫描参数对成像的影响也非常大,建立有效的参数优化组合模型,使临床测量结果误差最小,为样本的合理诊断分析提供有利参考。从理论和实用出发,任何CT能谱成像参数优化评价模型<sup>[1-3]</sup>和方法应尽可能具有科学合理、简洁直

观、朴实通用的特点。为此,选择了标准水膜作为样品,5个测量参数有序组合,测量552组数据,每组数据10个采样点,5组双基元组合模型方式,共测量数据上万个。采用多元线性回归分析、多元非线性二项式回归分析、多元非线性交叉分析和逐步回归分析法,建立理论模型,实现多个测量参数的优化组合。

### 1 材料和方法

#### 1.1 材料

采用GE公司标准水膜,扫描参数有转速、管电流、视野、层厚和螺距,不同的扫描条件有序组合,共测量数据552组。水膜上选取ROI1和ROI2两种测量方法。

**【收稿日期】**2015-04-30

**【基金项目】**国家自然科学基金(81470078)

**【作者简介】**盖立平(1970-),硕士,教授,从事医学物理学的教学和研究工作。Tel:0411-86110455;E-mail: gai\_liping@sina.com。

**【通信作者】**刘爱连(1963-),博士,教授,从事医学影像诊断学的诊断和研究工作。E-mail: cjr.liuailian@vip.163.com。

1.2 扫描方法

采用GE公司宝石能谱CT对标准水模进行不同条件GSI扫描。选择管电压分别为80 kVp和140 kVp,重建函数均为STND,能谱成像使用70 keV单能量图像用于图像质量的评估<sup>[4-6]</sup>。基物质对选择:水(钙)、水(HAP)、水(碘)、水(血)、水(脂)。管球旋转速度依次选择:0 s、0.6 s、0.7 s、0.8 s、0.9 s、1.0 s;扫描视野有大视野和小视野两种:Large和Medium;重建图像的层厚依次为:5 mm和1.25 mm;螺距选取:1.375和0.984两种模式;管电流选取:260 mA、275 mA、360 mA、375 mA、550 mA、600 mA、630 mA、640 mA<sup>[7-8]</sup>。

2 结果

2.1 不同ROI方法对GSI数据的影响

ROI两种测量方法是指测量范围的大小,如图1所示。ROI<sub>1</sub>—小圈,ROI<sub>2</sub>—大圈,大小呈同心圆样排列。ROI<sub>1</sub>和ROI<sub>2</sub>各自取了5个测量点,命名分别为上北(N),下南(S),左西(W),右东(E),中心(C)即C<sub>1</sub>,N<sub>1</sub>,S<sub>1</sub>,W<sub>1</sub>,E<sub>1</sub>和C<sub>2</sub>,N<sub>2</sub>,S<sub>2</sub>,W<sub>2</sub>和E<sub>2</sub>。测量结果取CT值和标准差SD。

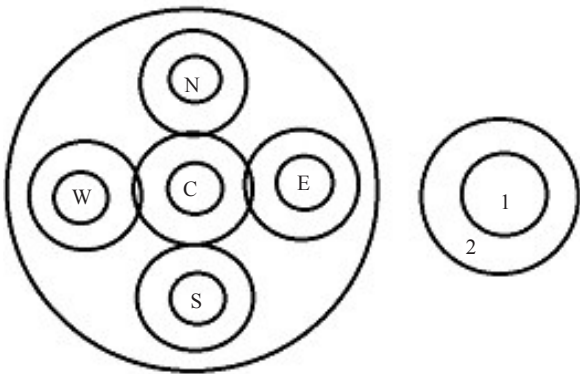


图1 ROI的位置  
Fig.1 Location of regions of interest (ROI)

对不同GSI序列扫描的552组测量数据进行筛选分析。表1为不同扫描序列的测量结果节选图,共有数据552组。根据CT值求标准偏差,ROI<sub>1</sub>和ROI<sub>2</sub>测量数据标准偏差为:

ROI<sub>1</sub>: SD- C<sub>1</sub>=1.113, SD- N<sub>1</sub>=1.388, SD- S<sub>1</sub>=1.533, SD- W<sub>1</sub>=1.396, SD- E<sub>1</sub>=1.438  
ROI<sub>2</sub>: SD- C<sub>1</sub>=1.728, SD- N<sub>2</sub>=1.575, SD- S<sub>2</sub>=1.580, SD- W<sub>2</sub>=1.593, SD- E<sub>2</sub>=1.638

表1 不同GSI扫描序列测量结果(节选部分)  
Tab.1 Measurement results of different GSI scanning sequences (partial data)

GSI	Speed/s	Current/mA	L/M	Pitch	Thick/mm	ROI <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	ROI <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	ROI <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	ROI <sub>1</sub> W <sub>1</sub>	ROI <sub>1</sub> E <sub>1</sub>	ROI <sub>2</sub> C <sub>2</sub>
GSI-53	0.5	360	1	1.375	5	-0.94	-0.84	-0.17	-1.63	-0.42	-0.94
GSI-50	0.7	260	1	1.375	1.25	-0.89	0.43	-0.41	0.4	-1.04	-0.34
GSI-53	0.5	360	1	1.375	1.25	-0.79	-0.3	-2.16	-1.94	-1.42	-0.16
GSI-49	0.7	260	2	1.375	1.25	-0.72	0.62	1.76	1.4	0.51	0.88
GSI-38	0.8	260	1	1.375	1.25	-0.69	-0.62	-0.13	0.7	-0.85	0.19
GSI-49	0.7	260	2	1.375	1.25	-0.64	1.41	2.05	1.56	0.31	0.81
GSI-53	0.5	360	1	1.375	1.25	-0.53	-0.28	-1.97	-1.83	-0.2	-0.21
GSI-50	0.7	260	1	1.375	1.25	-0.48	0.66	-0.86	0.56	-1.53	-0.32
GSI-42	0.6	360	1	1.375	1.25	-0.41	-0.11	-0.15	-0.05	-0.75	-0.16
GSI-38	0.8	260	1	1.375	1.25	-0.4	0.49	-0.11	0.8	-1.04	-0.04
GSI-49	0.7	260	2	1.375	1.25	-0.4	0.97	1.78	2.18	0.4	0.9
GSI-52	0.5	360	1	1.375	1.25	-0.33	1.64	-0.03	0.51	1.11	0.48
GSI-52	0.5	360	1	1.375	1.25	-0.32	1.54	-1.29	0.49	0.86	0.43
GSI-50	0.7	260	1	1.375	1.25	-0.3	0.5	-0.54	0.4	-1.3	-0.18

对比552组测量数据的标准偏差可知,同一测量位置,ROI<sub>1</sub>的测量结果标准差均小于ROI<sub>2</sub>,因此ROI<sub>1</sub>方法测量的数据均好于ROI<sub>2</sub>方法。对比所有标准偏差,发现ROI<sub>1</sub>-C<sub>1</sub>数值测量的标准偏差最小,数据最好,故此下面的参数优化分析都以ROI<sub>1</sub>-C<sub>1</sub>数据作为分析标准数据。

2.2 不同GSI序列扫描参数的影响

在552组数据中以ROI<sub>1</sub>-C<sub>1</sub>的数据为分析数据,Medium视野时CT(Average)=0.9221 HU;Large视野时CT(Average)=2.40396 HU,由于水膜的期望值CT=0 HU,所以,小视野Medium时模型更接近真实值。用552个水膜数据建立逐步回归模型,进行多元

逐步回归分析。逐步回归分析是一种从众多变量中有效地选择重要变量的方法。实际问题中影响因变量的因素可能很多,希望从中筛选影响显著的自变量来建立回归模型<sup>[10-11]</sup>。6个参数分别为Y为CT值

(ROI<sub>I</sub>-C1 中心小圈),X<sub>1</sub>,X<sub>2</sub>,X<sub>3</sub>,X<sub>4</sub>,X<sub>5</sub>分别为转速、管电流、视野、螺距和层厚。视野X<sub>3</sub>=2,代表大视野Large,X<sub>3</sub>=1时代表小视野Medium。样本模型如表2形式建立,共552组实验数据。

表2 多元逐步分析模型的建立(节选部分数据)  
Tab.2 Establishment of multiple stepwise analytic model (partial data)

Number	X <sub>1</sub> /s	X <sub>2</sub> /mA	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub> /mm	Y(ROI <sub>I</sub> -CT)
1	0.5	360	1	1.375	5	-0.94
2	0.7	260	1	1.375	1.25	-0.89
3	0.5	360	1	1.375	1.25	-0.79
4	0.7	260	2	1.375	1.25	-0.72
5	0.8	260	1	1.375	1.25	-0.69
6	0.7	260	2	1.375	1.25	-0.64
7	0.5	360	1	1.375	1.25	-0.53
8	0.7	260	1	1.375	1.25	-0.48
9	0.6	360	1	1.375	1.25	-0.41
10	0.8	260	1	1.375	1.25	-0.4

在MATLAB环境下,用552个测量样本,进行逐步回归分析,概率P的值越大,说明变量对模型的影响越不显著,测量结果如图2所示。转速的概率值为0.0747,管电流的概率值为0.000,视野的概率值为0.000,螺距的概率值为0.000,层厚的概率值为0.0003。图2中5个参量(X<sub>1</sub>,X<sub>2</sub>,X<sub>3</sub>,X<sub>4</sub>,X<sub>5</sub>)对模型的

影响均很大,均不能忽略。尤其是管电流、视野和螺距影响最大,概率为零,影响其次的是层厚和转速。MATLAB中的逐步回归分析依赖函数为:Stepwise(x,y,inmodel,α),其中x是自变量数据,y是因变量数据,分别用N×M和N×1矩阵,inmodel是矩阵的列数指标,α为显著性水平。

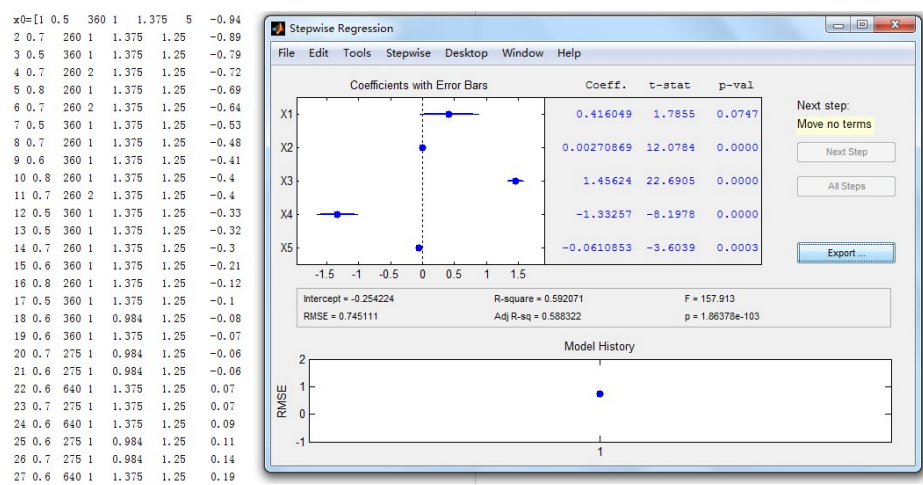


图2 扫描参数对测量结果的影响  
Fig.2 Influences of scanning parameters on measurement results

图3为Medium视野时多元逐步回归模型的测量结果,图中显示各项参数对模型均有显著影响,转速概率0.2218最高,因此转速影响最小,可以剔除。由于视野m=1,因此图中概率为1.000,可以不考虑。其他参数如管电流、螺距和层厚影响显著,不能忽略。

2.3 优化模型组合列表

采用多元线性回归模型、多元非线性回归模型和多元二项式组合分析模型,得到了优化组合模型,如表3所示。各种扫描参数对图像影响都较大,其中测量误差最小的数据,视野都是Medium=1的视野,转速选择最好的参数为0.5 s和0.6 s,管电流最好的



图3 Medium视野时的模型分析

Fig.3 Model analysis in medium view

选择是 275 mA 和 260 mA, 螺距 1.375 和 0.984 影响都较大, 应根据其他参数合理选择, 层厚 5 mm 和 1.25 mm 也应根据其他参数优化选择。表 3 中给出了对 CT 值影响最小的扫描参数组合。测量结果与实际测量结果吻合很好, 说明模型成立<sup>[12]</sup>。

### 3 讨论与分析

#### 3.1 多元线性回归模型(程序中的 y1 模型)

$$\text{一般称: } \begin{cases} Y = X\beta + \varepsilon \\ E(\varepsilon) = 0, COV(\varepsilon, \varepsilon) = \sigma^2 I_n \end{cases}$$

为高斯-马尔柯夫线性模型<sup>[13]</sup>(k 元线性回归模型), 并简记为  $(Y, X\beta, \sigma^2 I_n)$

表3 优化扫描参数组合列表

Tab.3 Optimization scanning parameters combination

Rotate speed/s	Current/mA	Large medium	Pitch	Thickness/mm	Expected CT
0.6	275	1	1.375	5	0.056
0.6	275	1	1.375	1.25	0.081
0.6	275	1	0.984	5	0.083
0.6	260	1	1.375	1.25	0.024
0.6	260	1	1.375	5	0.016
0.5	260	1	1.375	5	-0.026
0.5	275	1	1.375	5	0.014 7
0.5	260	1	0.984	5	0.030
0.5	275	1	0.984	5	0.088

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix}, \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_k x_k$  为回归方程。

#### 3.2 多元多项式回归模型

Purequadratic (纯二次模型):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_k x_k + \sum_{j=1}^m \beta_{jj} x_j^2$$

Interaction(交叉模型):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_k x_k + \sum_{1 \leq j \neq m \leq k} \beta_{jm} x_j x_m$$

实际采用模型为:

$$y1 = -0.2542 + 0.416X_1 + 0.0027X_2 + 1.4562X_3 - 1.3326X_4 - 0.0611X_5; \text{Linear}$$

$$y2 = -1.9036 + 5.7093X_1 + 0.0073X_2 + 0.8852X_3 - 2.9105X_4 - 0.1835X_5 - 0.0136X_1X_2 + 0.3831X_1X_3 + 1.1655X_1X_4 + 0.0351X_1X_5 + 0.0015X_2X_3 + 0.0024X_2X_4 - 0.0001X_2X_5 - 0.3761X_3X_4 + 0.031X_3X_5 + 0.0678X_4X_5; \text{Interaction}$$

模型实验结果如图 4 所示。

利用 Matlab 函数 stepwise(x, y) 多元逐步回归、regress(x, y) 多元线性回归、rstool(x, y) 多元回归和 polyfit(x, y) 一元非线性估计模型参数, 建立回归模型的数学表达式, 再利用 Microsoft 宏编程, 实现扫描参数的组合优选, 最终确定最佳扫描序列<sup>[14-15]</sup>。

### 4 结论

能谱 CT 成像扫描参数对图像有显著影响, 利用不同扫描参数组合测量 552 组水膜数据, 再采用多元线性回归模型和多元非线性回归模型进行数据分析, 可以实现参数的优化组合, 使测量结果更接近真实值。优化组合模型测量结果与实际测量结果吻合度非常好, 对临床诊断的正确评估有积极意义。

### 【参考文献】

- [1] Carolin S. Calculating a water poverty index[J]. World Dev, 2012, 30(7): 1195-1210.
- [2] 汪嘉杨, 王文圣, 李祚泳, 等. 基于 TS-SVM 模型的水安全评价[J]. 水资源保护, 2010, 26(2): 1-4.



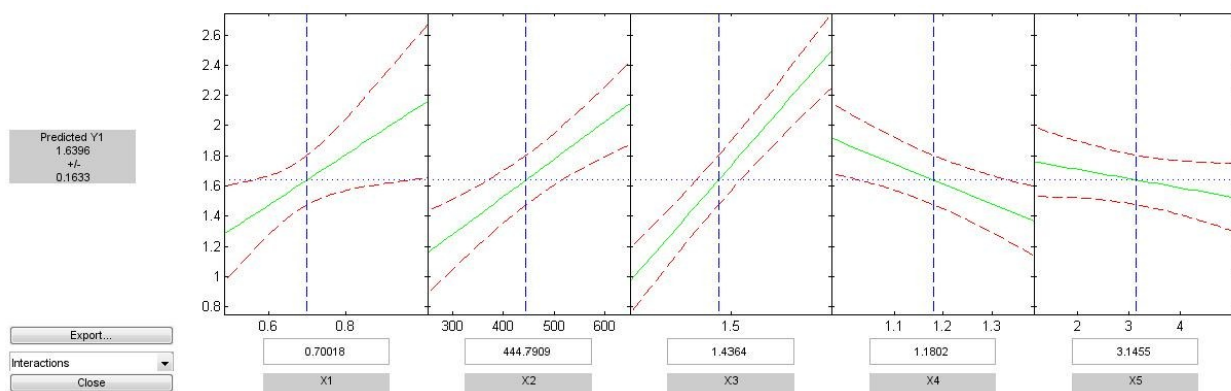


图4 552水膜-多元二项式交叉组合分析图

Fig.4 Multivariate binomial cross combination analysis of 552 water models (interaction)

- Wang JY, Wang WS, Li ZY, et al. Water safety assessment based on TS-SVM model[J]. Water Resources Protection, 2010, 26(2): 1-4.
- [3] 李祚泳, 张正健, 邹艳玲. 蛙跳算法优化的地下水水质评价的参数化组合算子模型[J]. 环境工程, 2010, 28(5): 94-97.
- Li ZY, Zhang ZJ, Zou YL. Parametric combination operator model optimized by shuffled frog leaping algorithm for ground water quality assessment[J]. Environment Engineering, 2010, 28(5): 94-97.
- [4] Matsumoto K, Jinzaki M, Tanami Y, et al. Virtual monochromatic spectral imaging with fast kilo voltages witching: Improved image quality as compared with that obtained with conventional 120-kVp CT[J]. Radiology, 2011, 259(1): 257-262.
- [5] Yu L, Leng S, McCollough CH. Dual-energy CT-based monochromatic imaging[J]. AJR Am J Roentgenol, 2012, 199: S9-S15.
- [6] Ho LM, Yoshizumi TT, Hurwitz LM, et al. Dual energy versus single energy MDCT: measurement of radiation dose using adult abdominal imaging protocols[J]. Acad Radiol, 2009, 16(11): 1400-1407.
- [7] 吉 强, 洪 洋. 医学影像物理学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2009: 5-25.
- Jin Q, Hong Y. Medical imaging physics [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2009: 5-25.
- [8] 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: 40-55.
- Chen KM. Principles and clinical applications of spectral Ct imaging [M]. Beijing: Science Press, 2012: 40-55.
- [9] Landry G, Joao S, Mathieu G, et al. Deriving effective atomic numbers from DECT based on a parameterization of the ratio of high and low linear attenuation coefficients[J]. Phys Med Biol, 2013, 58: 6851-6866.
- [10] Toepker M, Moritz T, Krauss B, et al. Virtual non-contrast in second-generation, dual-energy computed tomography: reliability of attenuation values[J]. Eur J Radiol, 2012, 81: e398-e405.
- [11] Primak AN, Ramirez JC, Liu X, et al. Improved dual-energy material discrimination for dual-source CT by means of additional spectral filtration[J]. Med Phys, 2009, 36: 1359-1369.
- [12] Evans JD, Whiting BR, O'Sullivan JA, et al. Prospects for *in vivo* estimation of photon linear attenuation coefficients using post processing dual-energy CT imaging on a commercial scanner: Comparison of analytic and polyenergetic statistical reconstruction algorithms[J]. Med Phys, 2013, 40(12): 121914.
- [13] Zimmermann HJ, Zysco P. Latent connectives in human decision making[J]. Fuzzy Set Syst, 1980, (4): 37-51.
- [14] 苏永彬, 许玉峰, 程晓光, 等. 采用CT能谱成像测量体模骨密度的精密度及准确度[J]. 中华放射学杂志, 2014, 48(11): 923-925.
- Su YL, Xu YF, Cheng XG, et al. Assessment of precision and accuracy of bone mineral measurement by using spectral CT imaging: phantom study[J]. Chinese Journal of Radiology, 2014, 48(11): 923-925.
- [15] 王正林, 龚 纯, 何 倩. 精通MATLAB科学计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 330-340.
- Wang ZL, Gong C, He J. Proficient in MATLAB scientific computing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 330-340.