

工业 CT 图像均匀性校正*

曾钢¹⁾ 刘力 阙介民 张英平 印胤 王燕芳 郁忠强 阎永廉

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 在工业 CT 图像重建过程中,射束硬化使得图像出现“杯状”伪影,阵列探测器响应不一致使得图像出现环状伪影、带状伪影和点伪影,影响图像均匀性.本文分析了射束硬化的原理和探测器响应不一致的数学模型,并通过实验,对探测器响应进行多挡板定标得到校正系数表.利用查表插值的方法对投影数据进行均匀性校正,消除上述伪影.

关键词 图像均匀性 射束硬化 阵列探测器 校正

1 引言

第三代工业 CT 成像技术过程可以描述为:射线源及探测器系统保持静止,被测物体在转台上作旋转运动,射线源对物体某一截面进行扫描,由探测器采集透射过物体后的射线强度,如图 1 所示,得到扫描数据并进行校正,由校正后的数据重建出被扫描物体该截面的二维平面图^[1].

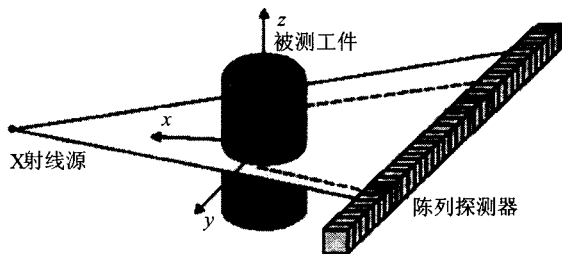


图 1 第三代 CT 扫描方式

正确的 CT 图像应能准确客观地反映被测物的断面结构特征和密度分布,这就要求均匀物质的 CT 图像有很好的均匀性.因此,图像均匀性是评价 CT 图像质量的一个重要指标.

在单能 X 射线的情况下,射线束流强度随吸收物质厚度按指数函数形式衰减,衰减系数为常数.然

而,实际工业 CT 使用的是具有连续能谱的 X 射线源.由于低能光子比高能光子更易于被物质吸收,因此在穿透物质的过程中,射线的平均能量逐渐变高,衰减系数逐渐减小,这就是射束硬化.它将影响重建图像的质量,使得密度均匀的切片在图像上表现为亮度不均,图像上的像素值呈“茶杯”状,如图 2(a)所示.

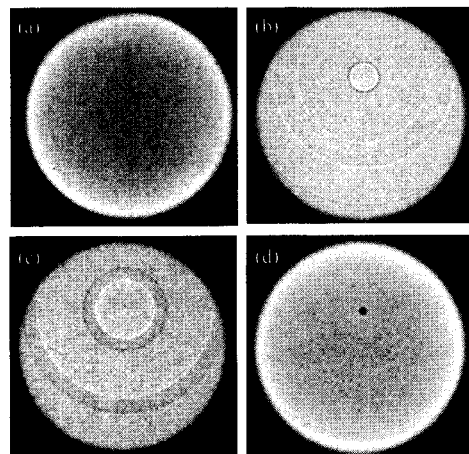


图 2 图像不均匀性的各种伪影

(a) 射束硬化;(b) 环状伪影;(c) 带状伪影;(d) 点伪影.

由于制造工艺的原因,阵列探测器的各个单元

2004-03-18 收稿

* 中国科学院知识创新工程重大项目(KJ CX1-SW-08)资助

1) E-mail: zenggang@mail.ihep.ac.cn

对相同强度的 X 射线有不同的响应,而且 X 射线源在不同角度发射出的 X 射线具有不同的能谱,因而阵列探测器的不同单元会有不同的响应.物体在扫描过程中作旋转运动,由于重建图像的像素密度是物质线性衰减系数的直观反映,探测器各个单元响应的不一致性将在三代工业 CT 重建图像中产生明显的环状伪影、带状伪影、点伪影,干扰对图像的判读,如图 2 (b),(c),(d)所示^[2].

因此,必须针对探测器不一致性、不同响应特性和射束硬化,对扫描数据作均匀性校正.

2 原理分析

单能 X 射线穿过均匀物质的衰减公式为

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (1)$$

由式(1)得

$$\mu x = -\ln \frac{I}{I_0}, \quad (2)$$

式中 I_0 为 X 光机输出的射线强度; I 为透过物质后的射线强度; μ 为物质的线性衰减系数; x 为射线所经过物质的长度. $-\ln(I/I_0)$ 为通常所称的投影数据 P .由式(2)可以看出,对于单能射线,投影数据与射线所经过物质的长度成正比.

物体关于多能 X 射线的线性衰减系数不仅与物质的密度有关,还与 X 射线的能谱有关.设 $S(E)$ 为 X 光源的能谱分布,则经过 x 厚度的物质后,射线强度变为^[3]

$$I_i = I_0 \int_E S(E) \exp\left(-\int_x \mu(x', E) dx'\right) dE, \quad (3)$$

其中 I_i 为透射过物质后与第 i 个探测器单元对应的射线强度; $\mu(x, E)$ 为被测截面上 x 点处的物质关于能量 E 的线性衰减系数.则对应第 i 个探测器单元的多能 X 射线投影值 P_i 为

$$P_i = -\ln(I_i/I_0) = -\ln \int_E S(E) \times \exp\left(-\int_x \mu(x', E) dx'\right) dE. \quad (4)$$

由式(4)可以得出,当射线源具有连续能谱分布时,投影值和射线经过物质的厚度成非线性关系.此时探测器的输出可以认为

$$t_i = a_i(I_i)I_i + b_i, \quad (5)$$

式中 a_i 为探测器单元 i 的响应函数; b_i 为不开 X 光源时探测器单元 i 的输出,即电子学台阶.把式(3)代入式(5)中可得

$$t_i = a_i(I_i)I_0 \int_E S(E) \times \exp\left(-\int_x \mu(x', E) dx'\right) dE + b_i, \quad (6)$$

变换 $a_i(I_i)$ 的自变量为 t_i 可得

$$t_i = a'_i(t_i)I_0 \int_E S(E) \times \exp\left(-\int_x \mu(x', E) dx'\right) dE + b_i. \quad (7)$$

在实际处理过程中,投影数据 P'_i 为

$$P'_i = -\ln \frac{t_i - b_i}{t_{0i} - b_i} = -\ln \frac{a_i(I_i)I_i}{a_i(I_0)I_0}, \quad (8)$$

式中 t_{0i} 为系统空载时第 i 个探测器单元的输出值.

比较式(8)与式(4),可以看出,对某个探测器单元来说,它的投影值不仅与射束硬化有关,而且与探测器单元本身的特性和所处的位置密切相关.

3 校正方法

对不同厚度的均匀物质进行透视扫描,得到每个探测器单元的响应曲线,即每个探测器单元的投影数据关于对应透射厚度的关系,图 3 中实线给出了其中两个单元的响应曲线.

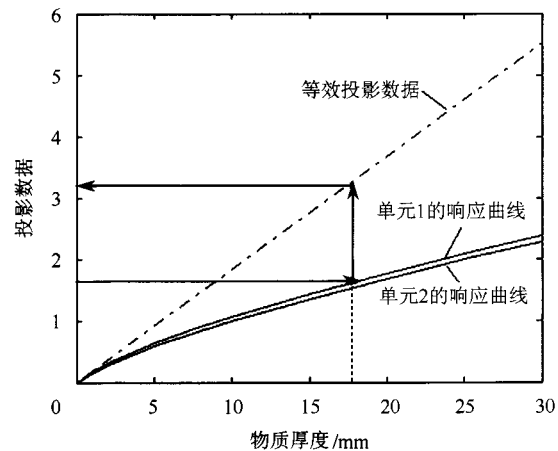


图 3 图像均匀性校正示意图

被测截面上某点的衰减系数不仅与经过该点射线的能量有关,还与该点本身所处的位置有关.为进行硬化校正,假定一个与能量、位置无关的等效衰减系数.等效衰减系数的值可以取为与射线平均能量对应的单能衰减系数.过原点做斜率为等效衰减系数的直线,如图 3 中点划线所示.

硬化校正就是将与能量、位置有关的投影数据

校正为与能量、位置无关的等效数据,即针对每一个探测器单元,将图 3 中实线上的投影数据校正为点划线上对应的等效投影数据,如图中箭头所示。

设衰减物在 n 种标定厚度下,第 i 个探测器单元的输出投影数据分别为 $P_{i,1}, P_{i,2}, \dots, P_{i,n}$, 与之对应的等效数据为 $Q_{i,1}, Q_{i,2}, \dots, Q_{i,n}$. 在实验过程中,若被扫描物体对应的第 i 个探测器的投影值为 P_i ,则可以用线性插值的算法来获得与之对应的等效数据 Q_i ,

$$Q_i = Q_{i,j} + \frac{P_i - P_{i,j}}{P_{i,j+1} - P_{i,j}}(Q_{i,j+1} - Q_{i,j}), \quad (9)$$

式中 $1 \leq j < n$, 且 $P_{i,j} \leq P_i < P_{i,j+1}$.

4 实验标定过程和结果

实验中 X 光机的工作电压为 170keV,工作电流为 6mA;探测器为包含 1024 个单元的条状阵列,每个单元宽度为 0.083mm.

探测器标定过程的流程如下:

1) 在不开 X 光源的情况下,测量电子学系统的输出值 $b_i, i = 1, \dots, 1024$;

2) 打开 X 光源,启动扫描控制,对空气进行透视扫描,获得 t_{0i} ;

3) 在 X 光源前面分别放置 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 30mm 的均匀铝片,进行透视扫描,得到 $t_{ij}, j = 1, \dots, 17$;

4) 计算投影数据 $P_{ij} = -\ln \frac{t_{ij} - b_i}{t_{0i} - b_i}$;

5) 按照图 3 中的箭头方向,计算每一个探测器单元(共 1024 个)在每一个铝片厚度(共 17 组)下,其投影数据相应的按等效衰减系数校正后的投影数据 $Q_{ij}, i = 1, \dots, 1024. j = 1, \dots, 17$;

6) 将每一个探测器单元的投影数据 P_{ij} 及其对应的等效投影数据 Q_{ij} 存盘,得到 $1024 \times 17 \times 2$ 的三维校正系数表,以备。

扫描一个直径为 11mm 的均匀铝柱.利用得到的三维数据表,通过查表插值的方法,对铝柱数据进行校正.利用滤波反投影算法进行图像重建,图 4 为得到的实验图像,其中(a),(b)是校正前的图像和灰度值,从图中可以看出,未校正的图像具有杯状伪影、环状伪影、点伪影;(c),(d)是校正后的图像和灰度值,原图中的各种伪影都被消除。

在图 4(c)中取 37 个 $1.66\text{mm} \times 1.66\text{mm}$ 的区域,如图 5(a)所示.计算各区域的灰度值,作出灰度值

的直方图,如图 5(b)所示。

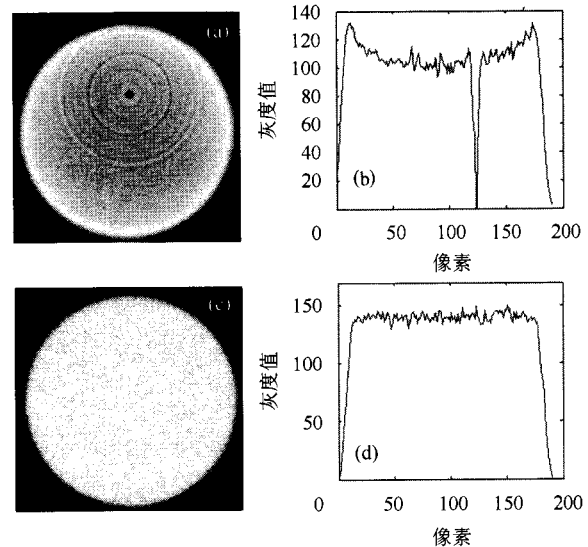


图 4 重建后的图像及其灰度值
(a) 受射束硬化和探测器不一致性影响的图像;(b) (a)图第 500 行的灰度曲线;(c) 均匀性校正后的图像;(d) (c)图第 500 行的灰度曲线。

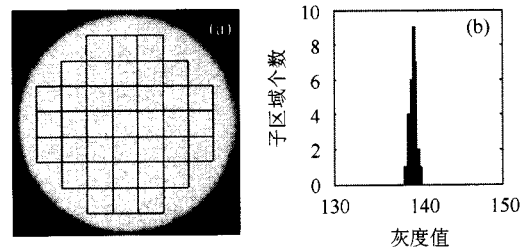


图 5 区域划分及灰度值直方图
(a) 区域划分;(b) 各区域灰度值直方图。

灰度值的相对均方根误差 r 为

$$r = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{37} (b_i - \bar{b})^2 / (37 - 1)}}{\bar{b}} \times 100\% = 3.6\%$$

灰度值的最大相对偏差 e 为

$$e = \frac{\max_{1 \leq i \leq 37} |b_i - \bar{b}|}{\bar{b}} \times 100\% = 8.6\%$$

式中 b_i 表示各区域灰度值, \bar{b} 表示 37 个灰度值的平均值。

5 结论

本文提出的校正方法能同时消除射束硬化和探

测器不一致性对重建图像均匀性的影响. 对于均匀铝柱, 校正后图像灰度值的相对均方根误差为 3.6‰, 相对最大偏差为 8.6‰.

参考文献 (References)

- 1 Herman G T. Image Reconstruction From Projections: The Fundamentals of Computerized Tomography[M]. Beijing: Science Press, 1985: 25—38 (in Chinese)
(赫尔曼 G T. 由投影重建图像——CT 的理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 1985, 25—38)
- 2 WANG Xue-Li. CT Theory and Applications, 2003, 12(3): 46—52 (in Chinese)
(王学礼. CT 理论与应用研究. 2003, 12(3): 46—52)
- 3 Chye Hwang Yan et al. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2000, 19(1): 1

Uniformity Calibration for ICT Image *

ZENG Gang¹⁾ LIU Li QUE Jie-Min ZHANG Ying-Ping YIN Yin
WANG Yan-Fang YU Zhong-Qiang YAN Yong-Lian
(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The uniformity of ICT image is impaired by beam hardening and the inconsistency of detector units responses. This paper analyzes the beam hardening and the nonlinearity of the detector's output. The correction factors are determined experimentally by the detector's responses with different absorption length. The artifacts in the CT image of a symmetrical aluminium cylinder have been eliminated after calibration.

Key words image uniformity, beam hardening, detector array, calibration