

基于蒙特卡罗模拟的射束硬化校正方法*

曾钢¹⁾ 郁忠强 阎永廉

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 传统的射束硬化校正方法, 通常需要针对每一种材料测量该材料对射线的吸收曲线. 由于吸收曲线对实验条件有很大的依赖性, 每当改变X光机电压或者被测工件的材料等条件时, 需要重新测量吸收曲线才能完成硬化校正过程. 这种方法费事费时. 本文提出了基于蒙特卡罗模拟计算物质吸收曲线的硬化校正方法. 实验中, 分别用本方法和传统的硬化校正方法对铝工件进行硬化校正, 经过比较, 确认本方法是有效的. 然后用该方法对不同材料(铝、铁和铜)的工件进行校正. 实验结果表明, 本方法能有效消除各种材料工件图像中的硬化伪影, 是快速的和切实可行的.

关键词 CT 校正 射束硬化 吸收曲线 蒙特卡罗方法

1 引言

传统的CT图像重建算法, 都是基于X射线源为单能的假设. 在单能X射线情况下, 射线束流强度随吸收物质厚度按指数形式衰减, 衰减系数为常数.

实际工业CT使用的X射线源具有韧致辐射连续能谱. 当这样的射线穿过被扫描工件时, 低能部分由于吸收系数较大而更易于被物质吸收. 随着吸收物质厚度的增加, 射线中能量较低的光子所占份额也越来越少, 使得射线的平均能量变高, 能谱变“硬”, 这就是射束硬化. 它将影响重建图像的质量: 对于均匀圆柱, 得到的断层图像不是一个均匀的圆形平面, 其灰度沿半径方向不断改变, 在边缘处明显偏亮, 灰度曲线呈“杯”状.

硬化校正最简单的方法是光谱制约法, 通过在X射线源上附加的铜滤片(厚度0.25—0.4mm)和管窗的自过滤(2.5mm铝)^[1], 先将X射线束适度硬化, 使能谱变窄. 这种方法可以有效地抑制硬化效应, 但它不能完全解决射束硬化的问题.

迭代算法将引起硬化的因素归结到系统的概率矩阵中, 硬化校正和图像重建同时完成^[2, 3]. 但是该类算

法通常很难满足图像重建速度的要求.

非线性函数校正法是硬化校正的另一种方法^[4—7]. 该方法原理简单, 其主要思想是根据事先测量好的物质对射线的吸收曲线, 将扫描后得到的多能投影数据校正为单能投影数据. 该算法的最大局限性在于, 吸收曲线对实验条件有很强的依赖性, 一条吸收曲线只能在某个特定实验条件下对某种特定材料工件(如铝件)的投影数据进行校正. 如果实验条件或者被测工件材料发生变化, 需要重新扫描新的标准件以测量新的吸收曲线. 每一条吸收曲线的建立都需要花费很多时间, 因此该方法在实际工程应用中受很大限制.

本文提出基于蒙特卡罗模拟的射束硬化校正方法. 该方法基于对X射线能谱和各种不同材料物质的模拟, 首先利用蒙特卡罗模拟软件GEANT3计算出不同材料的吸收曲线, 然后用非线性函数法将多能投影数据校正为单能投影数据. 这种方法具有很大灵活性, 能适应X光机能量/电压、过滤片、工件材料等条件的变化, 在较短时间内迅速完成硬化校正过程. 实验结果表明, 该方法能够快速有效地对各种不同材料工件进行硬化校正. 校正后, 图像质量改善明显.

2005 - 05 - 13 收稿

*中国科学院知识创新工程重大项目(KJ CXI-SW-08)资助

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

2 原理分析

2.1 射束硬化

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^[8]

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

其中 I 为透射过物质后的射线强度; $\mu(x, E)$ 为被测截面上 x 点处的物质关于能量 E 的线性衰减系数. 则多能 X 射线投影值 q 为

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

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, 如图 1 所示.

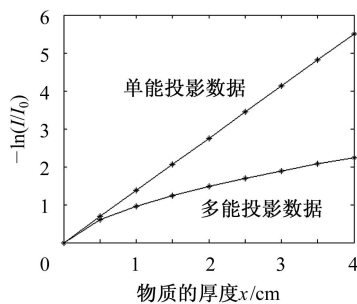


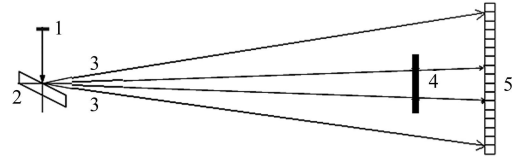
图 1 投影数据与透射厚度之间的关系

2.2 射束硬化的蒙特卡罗模拟

GEANT3 是为粒子物理实验开发的大型蒙特卡罗软件系统.

图 2 为由蒙特卡罗方法模拟的 CT 硬件系统. 170keV 电子束轰击钨靶产生韧致辐射 X 射线, 其能

谱如图 3 所示. 射线穿过不同厚度铝片以后, 由线阵列探测器接收.



1:电子束 2:钨靶 3:X射线 4:被测工件 5:阵列探测器

图 2 蒙特卡罗模拟 CT 系统

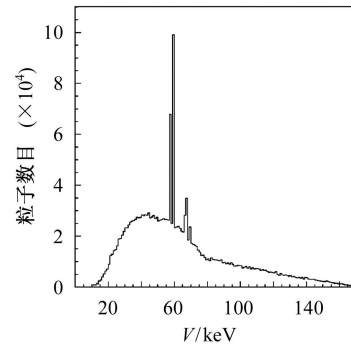


图 3 170keV 电子束轰击钨靶产生的 X 射线能谱

当 X 射线管管电压升高时, 对于一定的靶材料, 当管电压超过激发电压后, 会在一些特定能量上有若干特别强大的峰值叠加在连续谱之上. 这些峰值出现的特定能量与靶材料的元素有一一对应的关系. 这种叠加在连续谱之上的单色峰值谱线称为特征 X 射线. 钨的 $K_{\alpha 1}$, $K_{\alpha 2}$, $K_{\beta 1}$, $K_{\beta 2}$ 激发电压分别为 59.3kV, 58.0kV, 67.2kV, 69.0kV^[9], 当管压为 170kV 时, 在上述能量位置出现强度峰值, 如图 3 X 射线能谱中的准单能峰所示.

射束硬化后的能谱如图 4 所示, 从左至右分别为 X 射线经过 1mm, 5mm, 10mm, 15mm 铝工件后的能谱. 随着铝厚度的逐渐变大, 射线低能光子易被吸收, 射线的平均能量逐渐变高, 能谱越来越“硬”.

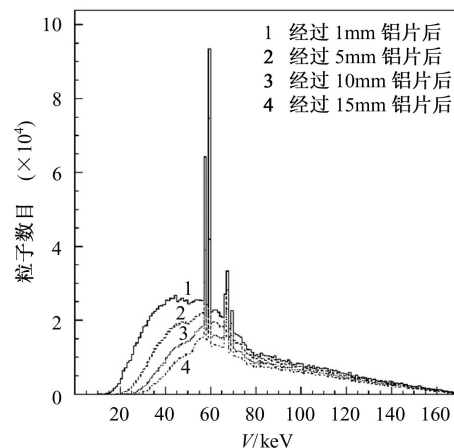


图 4 射线经过不同厚度铝后的能谱

3 校正方法

被测工件的截面上某点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.硬化校正就是将与能量、位置有关的多能投影数据校正为与能量、位置无关的单能投影数据.

首先应当测量各种不同材料物质的吸收曲线(可以通过实验测量或者进行蒙特卡罗模拟),如图1中的“多能投影数据”.对该曲线进行非线性函数拟合.实际工程应用中,利用得到的拟合函数将扫描的投影数据校正为单能投影数据.

对图1中的曲线进行非线性函数拟合:

$$p = f(x). \quad (5)$$

在实际校正过程中,首先将测量得到的工件投影数据 p 代入式(5),得到各投影数据所对应的等效物质厚度 x ,

$$x = f^{-1}(p). \quad (6)$$

图1中单能投影数据曲线

$$q = \mu x, \quad (7)$$

式(7)中, μ 是等效衰减系数.它是常数,与射线能量、被测截面位置无关. μ 的值通常可以取为与射线平均能量对应的线性衰减系数.

将式(6)代入(7),得到校正后的单能投影数据 q ,

$$q = \mu f^{-1}(p), \quad (8)$$

用校正后的投影数据 q 代替实验测得的数据 p 进行图像重建.

4 校正结果

4.1 蒙特卡罗模拟与实验的比较

为了确定基于蒙特卡罗模拟的硬化校正方法的有效性,除了需要将蒙特卡罗模拟得到的吸收曲线与实验进行对比外,还要看数据校正后重建图像的质量如何.

实验中X光机的工作电压为170kV,工作电流为8mA,CT系统的积分时间为17ms;探测器为包含1024个单元的钨酸铬探测器,每个单元宽度为83 μm .在X光源前分别放置1—30mm厚度不等的铝标准件,进行透视扫描^[10],得到铝在该实验条件下的吸收曲线.

用GEANT3软件按照图2所示系统及上述实验条件模拟该实验过程,得出不同厚度铝对应的投影数据.

图5分别给出实验测量得到的和由蒙特卡罗模拟得到的铝投影数据.从图中可以看出,两者符合得很好.

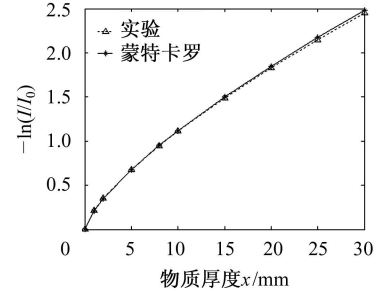


图5 实验测量的和蒙特卡罗模拟得到的铝投影数据

在上述实验条件下,扫描一直径为11mm的均匀铝柱.分别用蒙特卡罗模拟与实验得到的吸收曲线对其进行校正.利用滤波反投影算法^[11]进行图像重建,见图6,其中(a),(b)是未校正的图像及其CT值曲线,(c),(d)是用实验测得的吸收曲线校正后的图像及其CT值曲线,(e),(f)是用蒙特卡罗模拟得到的吸收曲线校正后的图像及其CT值曲线.

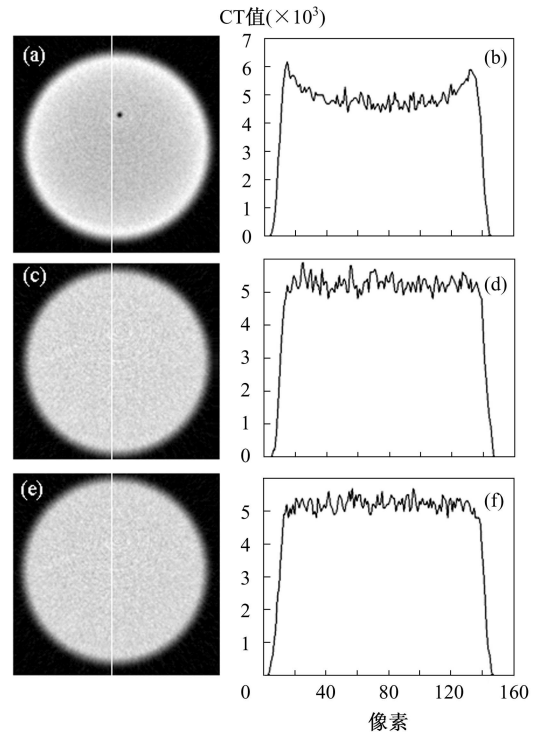


图6 一个铝圆柱工件校正前后的图像及其CT值曲线

图6(a),(c),(e)的噪声分别为2.15%, 2.63%, 2.57%.由于在校正过程中利用了图5所示的铝投影数据,引入了新的误差因素,所以校正后图像的噪

声比校正前图像噪声大。

从图6中可以看出经过校正后图像质量明显改善, (a)中边沿处因射束硬化造成的“亮边”及(b)中的“杯状伪影”被校正掉, (a)中的点伪影得到很大改善. (e)与(c)在视觉效果上无明显差别, (f)与(d)无明显差别. 且两者噪声水平相差不大.

因此, 用蒙特卡罗模拟建立的吸收曲线进行硬化校正, 是有效的和切实可行的.

4.2 对铝、铁、铜工件的硬化校正

在前述实验条件下, 扫描一外径为116.8mm、内径为112.0mm的铝圆筒, 用蒙特卡罗模拟得到的吸收曲线对其数据进行硬化校正. 重建后的图像如图7所示, 其中(a), (b)是未校正的图像及其CT值曲线, (c), (d)是用蒙特卡罗模拟得到的吸收曲线校正后的图像及其CT值曲线.

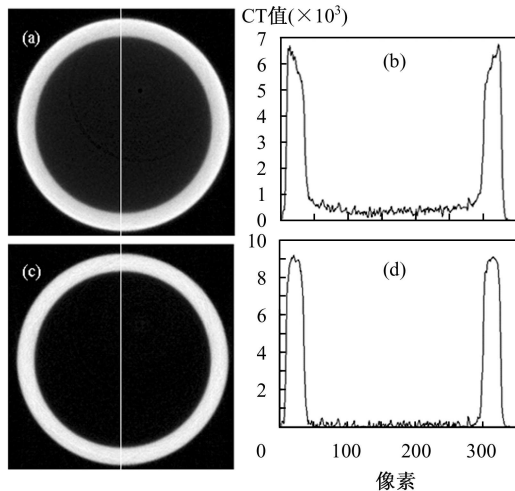


图7 一个铝圆筒工件校正前后的图像及其CT值曲线

图7(a), (c)的噪声分别为1.84%, 2.00%.

从图中可以看出, (a), (b)中的硬化伪影被校正掉.

扫描一外径为134.5mm、内壁为多边形的铁套筒, 用蒙特卡罗模拟得到的吸收曲线对其数据进行硬化校正. 重建后的图像如图8所示, 其中(a), (b)是未校正的图像及其CT值曲线, (c), (d)是用蒙特卡罗模拟得到的吸收曲线校正后的图像及其CT值曲线.

图8(a), (c)的噪声为6.25%, 9.93%. 图8的噪声显著大于图7的噪声, 这是因为, 在170kV X光机的实验条件下, 铁的质量衰减系数4倍于铝的质量衰减系数(分别为 $1.205\text{cm}^2/\text{g}$, $0.2778\text{cm}^2/\text{g}$ 左右), 且该铁套筒工件尺寸较大, 故X射线透射过该工件后, 探测器接收到的光子数目显著减少, 造成较大统计误差.

从图中可以看出, (a), (b)中的硬化伪影被校正掉.

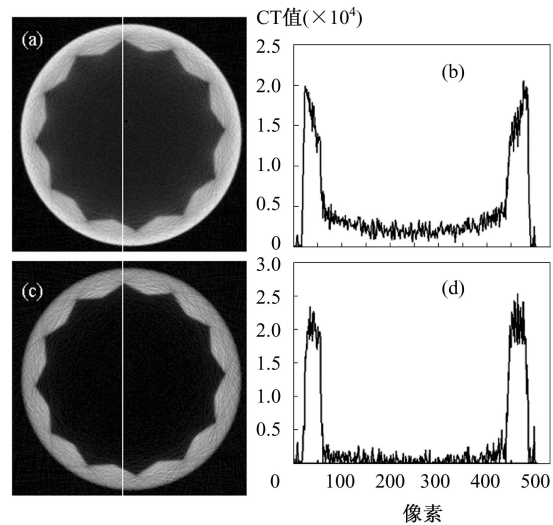


图8 一个铁套筒工件校正前后的图像及其CT值曲线

扫描一内径为3.9mm、壁厚为2.5mm左右的铜工件, 用蒙特卡罗模拟得到的吸收曲线对其数据进行硬化校正. 重建后的图像如图9所示, 其中(a), (b)是未校正的图像及其CT值曲线, (c), (d)是用蒙特卡罗模拟得到的吸收曲线校正后的图像及其CT值曲线.

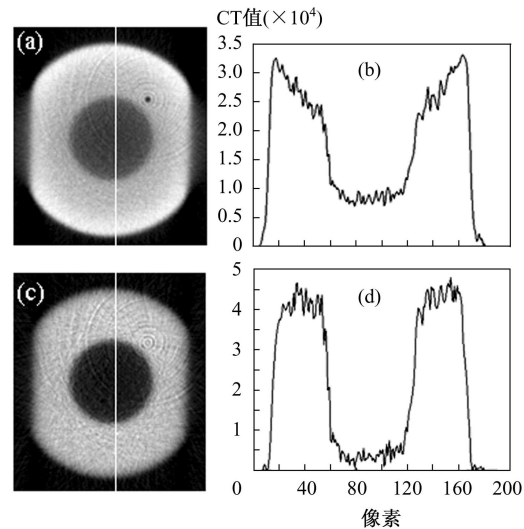


图9 一个铜工件校正前后的图像及其CT值曲线

图9(a), (c)的噪声分别为3.54%, 5.01%.

从图中可以看出, (a), (b)中的硬化伪影被校正掉.

综上所述, 不论是铝、铁还是铜工件, 经过校正以后, 图像的硬化伪影都被消除.

5 小结与讨论

传统的射束硬化校正方法, 通常需要针对每一种材料测量该材料对射线的吸收曲线. 由于吸收曲线对实验条件有很大的依赖性, 每当改变X光机电压或者

被测工件的材料等条件时,需要重新测量吸收曲线才能完成硬化校正过程.这种方法费事费时.

本文提出的基于蒙特卡罗模拟测量物质吸收曲线的硬化校正方法,能够改变以往校正方法对不同材料标准件的依赖.该方法具有很大灵活性,能适应被测工件的材料变化迅速完成对扫描数据的校正工作.实验结果表明,经过校正以后,各种材料工件图像的硬化伪影都被消除.

本次实验中X光机的工作电压为170kV,若改变X光机的工作电压,或者改变CT系统的几何参数以及阵列探测器的参数,这种基于蒙特卡罗模拟的方法

同样能迅速完成校正工作.

对于一台特定的CT系统,可以预先用蒙特卡罗模拟方法计算出各种常用材料在某些测量条件下的吸收曲线,建立一个数据库以备.

需要说明的是,该校正方法只适用于被扫描工件只包含单一材料的情形.包含多种材料的扫描工件的数据硬化校正需作进一步的研究.

作者感谢赵永界研究员、刘力副研究员、邓虎、阙介民在扫描实验及图像重建过程中的指导和协助.

参考文献(References)

- 1 WU Shi-Fa. Modern Imaging Technology and Image Process. Beijing: National Defence Industry Press, 1997. 143—144 (in Chinese)
(吴世法. 近代成像技术与图象处理. 北京: 国防工业出版社. 1997. 143—144)
- 2 Chye Hwang Yan, Whalen Robert T et al. Med. Phys., 1999, **26**(4): 631—642
- 3 Elbakri Idris A et al. IEEE Trans. Med. Imag., 2002, **21**(2): 89—99
- 4 Nalcioglu O, LOU R. Y. Phys. Med. Biol., 1979, **24**(2): 330—340
- 5 CHEN Chun-Yuan, Chuang Keh-Shih et al. Journal of Digital Imaging, 2001, **14**(2): 54—61
- 6 E Van de Casteele et al. Phys. Med. Biol., 2002, **47**: 4181—4190
- 7 YANG Min et al. Optical Technique, 2003, **29**(2): 177—178 (in Chinese)
(杨民等. 光学技术, 2003, **29**(2): 177—178)
- 8 Gaboor T Herman. Image Reconstruction from Projections: the Fundamentals of Computerized Tomography. Beijing: Science Press, 1985. 308—309 (in Chinese)
(G T 赫尔曼. 由投影重建图像—CT的理论基础. 北京. 科学出版社, 1985. 308—309)
- 9 <http://xray.uu.se/hypertext/XREmission.html>
- 10 ZENG Gang et al. HEP & NP, 2004, **28**: 1131—1134 (in Chinese)
(曾钢等. 高能物理与核物理, 2004, **28**: 1131—1134)
- 11 ZHUANG Tian-Ge. The Principle and Algorithm of CT. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1992. 30—76 (in Chinese)
(庄天戈. CT原理与算法. 上海: 上海交通大学出版社, 1992. 30—76)

Beam Hardening Correction Based on Monte Carlo Simulation^{*}

ZENG Gang¹⁾ YU Zhong-Qiang YAN Yong-Lian

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract For the empirical beam hardening correction in computerized tomography (CT), it is necessary to measure an attenuation curve for the material. The attenuation curve depends on the X ray machine operation parameters and object material, etc. If any measuring condition changes, a new attenuation curve has to be measured. This approach is time consuming and difficult to implement. A new method of beam hardening correction is presented in this paper, which is based on Monte Carlo simulation of the attenuation characteristic. An aluminium object is scanned and the projection data is corrected by the empirical beam hardening correction and by the simulation based correction. The results of the reconstructed images confirm the correctness of the simulation based method. The simulation based correction has been applied successfully to CT projection data of several test samples, with the material of aluminum, steel and copper.

Key words CT, correction, beam hardening, attenuation curve, Monte Carlo simulation

Received 13 May 2005

^{*}Supported by Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX1-SW-08)

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