

工业 CT 在工件检测中 X 射线硬化校正

彭光含^{1,2}, 蔡新华¹, 韩忠³, 杨学恒³

- 1. 湖南文理学院物电学院, 湖南常德 415000
- 2. 重庆大学自动化学院, 重庆 400030
- 3. 重庆大学数理学院, 重庆 400030

摘要 X射线工业CT中,由于X射线能谱具有多色性,X射线在透射物质时,能量较低的射线优先被吸收,X射线能量越高,衰减系数越低。也即较高能量的X射线的衰减系数比较低能量的X射线的衰减系数小。射线随透射厚度增大,变得更易穿透,也就是发生了能谱硬化现象。由于射线硬化现象使图像重建时出现伪影,因此必须修正。文中对X射线硬化现象进行了分析,探讨了在均匀物质中,X射线射束和与透射厚度的关系。并根据Beer定律和X射线与物质作用的特点,通过获取X射线射束和数据,拟合出射束和与透射厚度的关系式。然后得出在同一透射厚度时,X射线射束和校正为单色等效射束和的关系及其等效方法。最终得出X射线等效单色射线的衰减系数的拟合值。再对此衰减系数拟合值进行卷积反投影重构,即可有效消除X射线射束硬化的影响。

关键词 X射线; ICT; 硬化校正; 射束和

中图分类号: O434.1; TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-0593(2008)06-1426-04

引言

X射线工业CT中,由于X射线源能量谱具有多色性和连续性,X射线源在穿过物质,与物质发生相互作用时,能量较低的射线优先被吸收^[1,2],射线随透射厚度增大,平均能量增大,变得更易穿透,这就是能谱硬化现象^[3-5]。它影响着CT重构的质量,使得密度均匀的切片在重构图像上表现为亮度不均,图像上的像素值分布呈“茶杯”状,如未校正,必影响CT图像质量。

1 X射线硬化分析

CT图像重建是以衰减系数 μ 进行卷积反投影重构得到的。对于单色源,如 γ 射线源,由于射线能量单一,对某给定均匀物质,射线的衰减系数 μ 是一恒值。因此,对于理想单色源,射线衰减遵守Beer定律^[4]。

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

式中: I 表示射线透射强度, I_0 表示入射光强度, x 表示透射

厚度。变换后: $\ln(I_0/I) = \mu x$,若令: $y = \ln(I_0/I)$,本文称之为射束和。则Beer定律可写成射束和Beer定律形式

$$y = \mu x \quad (2)$$

即在单色源情况下, y 与 x 成线性关系^[1],如图1中过原点的斜线。对于多色源,射线穿过物质时的透射强度^[5]为,

$$I' = \sum_i I_{0i} e^{-\mu(E_i)x} \quad (3)$$

其中: I_{0i} 是进入工件前能量为 E_i 的光子强度, $\mu(E_i)$ 是能量为 E_i 时的衰减系数。因此,在工业CT中X射线透过物质时,不同能量部分被衰减的量不同,也即被测样品内的同一处对同一射线表现为多个衰减系数,发生了能谱硬化现象。

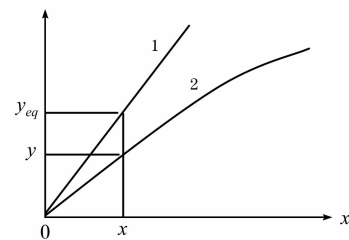


Fig. 1 Relation between beam sum and transmission thickness

1: Monochromatic ray; 2: X-ray

收稿日期: 2007-06-26, 修订日期: 2007-10-06

基金项目: 国家科委“八五”火炬计划项目, 湖南省自然科学基金项目(07JJ6106), 湖南“十一五”重点建设-学科光学基金项目 and 湖南省教育厅科研项目(06C606)资助

作者简介: 彭光含, 1973年生, 湖南文理学院物电系讲师 e-mail: pengguanghan@yahoo.com.cn

在射线硬化情况下, 衰减系数 μ 是随能量 E 变化的函数值 $\mu(E)$ ^[1]。对于连续谱 X 射线源穿透物质的透射强度可由 (3) 式积分求出^[3-5],

$$I_p = \int_{E_1}^{E_2} I_0(E) e^{-\mu(E)x} dE \quad (4)$$

其中: $I_0(E)$ 为入射强度随能量 E 的分布函数。 E_1 和 E_2 分别表示 X 射线频谱的最小和最大能量值。由 (4) 式可知, X 射线的透射强度是透射厚度 x 的函数。如果按上述射束和 $\ln(I_0/I_p)$ 来做为图像重建的数据来源, 即令

$$\ln(I_0/I_p) = \mu_{eq} x \quad (5)$$

则射束和与透射厚度成非线性关系, 如图 1 中过原点的曲线^[3]。如对此衰减系数 μ_{eq} 卷积反投影法图像重建, 必产生条状或环状伪影。

对于单色源, 射束和直线斜率即为单色衰减系数 μ , 为将 X 射线衰减系数修正为单色衰减系数, 由图 1 可知, 对同一厚度和同一衰减系数, X 射线射束和 y 应修正为等效射束和 y_{eq} 。

2 X 射线硬化校正

在 X 射线工业 CT 中, 对给定某一均匀物质, 假设对应该均匀物质的一组透射厚度 x , 以矩阵表示, (T 表示转置)。

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (6)$$

测得相应的 X 射线透射强度 I_p , 则对应的射线和

$$y = \ln(I_0/I_p) = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T \quad (7)$$

则可以用曲线 $y = ax^b$ 对所测数据进行曲线拟合。方法是: 两边取对数得

$$\lg y = \lg a + b \lg x \quad (8)$$

令

$$\begin{aligned} x' &= [x'_1, x'_2, \dots, x'_n]^T \\ &= \lg x = [\lg x_1, \lg x_2, \dots, \lg x_n]^T \\ y' &= [y'_1, y'_2, \dots, y'_n]^T \\ &= \lg y = [\lg y_1, \lg y_2, \dots, \lg y_n]^T \\ a' &= \lg a, b' = b \end{aligned}$$

则

$$y' = a' + b' x' \quad (9)$$

则 a', b' 可用最小二乘法拟合估计

$$\hat{b}' = \frac{Lx'y'}{Lx'x'} = \frac{\sum_{i=1}^n (y'_i - \bar{y}')(x'_i - \bar{x}')}{\sum_{i=1}^n (x'_i - \bar{x}')^2} \quad (10)$$

其中

$$\bar{y}' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y'_i, \bar{x}' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x'_i, \hat{a}' = \bar{y}' - \hat{b}' \bar{x}' \quad (11)$$

则可以得到 a, b 的拟合估计值

$$\hat{b} = \hat{b}', \hat{a} = 10^{\hat{a}'} \quad (12)$$

则图 1 中 X 射束和曲线可用下列拟合方程来拟合

$$y = \hat{a}' x^{b'} \quad (13)$$

则对应同一透射厚度 x , 为保证 X 射线等效为单色射线的衰减系数, 由 Beer 定律可知, 射束和 y 应表为等效射束和 y_{eq} ,

如图 1 所示, 即修正后的等效 Beer 定律应表为

$$y_{eq} = \mu x \quad (14)$$

由 (13) 式和 (14) 式, 消去透射厚度 x , 得到等效射束和 y_{eq} ,

$$\begin{aligned} y_{eq} &= [y_{eq1}, y_{eq2}, \dots, y_{eqn}]^T = \mu \left(\frac{y}{\hat{a}'} \right)^{\frac{1}{b'}} = \\ &= \left[\mu \left(\frac{y_1}{\hat{a}'} \right)^{\frac{1}{b'}}, \mu \left(\frac{y_2}{\hat{a}'} \right)^{\frac{1}{b'}}, \dots, \mu \left(\frac{y_n}{\hat{a}'} \right)^{\frac{1}{b'}} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

衰减系数 μ 是关于射线能量、物质密度、物质原子序数和质量数的函数, 而对给定某均匀物质, 衰减系数仅是能量的函数值 $\mu(E)$ ^[1], 因此, 对于 X 射线欲修正为单色 μ 值, 该 μ 值可用 X 射线刚进入物质时对应初始等效能量值 E_{eq0} 所对应的衰减系数 μ_0 等效^[4]。初始等效衰减系数 μ_0 可表为^[4],

$$\mu = \mu(E_{eq0}) = \mu_0 = \frac{\int_{E_1}^{E_2} \mu(E) I_0(E) dE}{I_0} \quad (16)$$

由 (4) 式可得

$$I_0 = \int_{E_1}^{E_2} I_0(E) dE \quad (17)$$

在中低能 X 射线工业 CT 中, X 射线的总衰减系数 μ_{tot} 由光电效应 μ_{ph} 和 Compton 散射效应 μ_c 组成^[3, 5, 6]。即

$$\mu_{tot} = \mu_{ph} + \mu_c \quad (18)$$

$$\mu(E) = n_e (\delta_{ph}(E) + \delta_c(E)) \quad (19)$$

其中: n_e 为物质平均电子密度。

$$n_e = \frac{N_s Z \rho}{M} \quad (\text{e/g}) \quad (20)$$

N_s 表示阿伏伽德罗常数, Z 为物质原子序数, ρ 为物质密度, M 为物质原子质量数。 δ_{ph}, δ_c 分别表示光电效应微分截面和每个原子的 Compton 散射截面。只考虑非相对论情形下, 光电效应微分截面^[3, 5]

$$\delta_{ph}(E) = \frac{5}{4} \sqrt{32} \alpha^4 \left(\frac{mc^2}{E} \right)^{7/2} Z^5 \delta_{th} \quad (21)$$

其中: $\alpha = 1/137$, 为精细结构常数, $\delta_{th} = 6.65 \times 10^{-25} \text{cm}^2$ 为汤姆逊散射截面。

每个原子的 Compton 散射截面^[7, 8]为,

$$\begin{aligned} \delta_c(E) &= 2\pi r_0^2 \left\{ \frac{\ln(1+2\tau\omega)}{2\tau\omega} - \frac{1+3\tau\omega}{(1+2\tau\omega)^2} + \right. \\ &\quad \left. \frac{1+\tau\omega}{\tau^2} \times \left[\frac{2(1+\tau\omega)}{1+2\tau\omega} - \frac{\ln(1+2\tau\omega)}{\tau} \right] \right\} \end{aligned} \quad (22)$$

其中: r_0 为经典电子半径, $r_0 = 2.818 \times 10^{-13} \text{cm}$, $\omega = E/(mc^2)$, mc^2 为电子静止质量, $mc^2 = 0.511 \text{Mev}$

$$\mu_0 = \frac{\int_{E_1}^{E_2} n_e (\delta_{ph}(E) + \delta_c(E)) I_0(E) dE}{I_0} \quad (23)$$

则对应同一透射厚度 x , X 射线射束和 y 修正为单色等效射束和的拟合值 y_{eq} 可表为

$$\begin{aligned} \hat{y}_{eq} &= [\hat{y}_{eq1}, \hat{y}_{eq2}, \dots, \hat{y}_{eqn}]^T = \mu_0 = \mu_0 \left(\frac{y}{\hat{a}'} \right)^{\frac{1}{b'}} = \\ &= \mu_0 \left[\left(\frac{y_1}{\hat{a}'} \right)^{\frac{1}{b'}}, \left(\frac{y_2}{\hat{a}'} \right)^{\frac{1}{b'}}, \dots, \left(\frac{y_n}{\hat{a}'} \right)^{\frac{1}{b'}} \right]^T \end{aligned} \quad (24)$$

于是, 修正后等效 Beer 定律拟合方程可表为

$$\hat{y}_{eq} = \mu x \quad (25)$$

则校正为单色射束和后的等效衰减系数拟合值可用最小二乘法拟合,

$$\hat{\mu} = \frac{Lx\hat{y}_{\text{eq}}}{Lx\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (x'_i - \bar{x}') (y_{\text{eq}i} - \bar{y})}{\sum_{i=1}^{i=n} (x'_i - \bar{x}')^2} \quad (26)$$

其中: $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{y}_{\text{eq}i}$, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 。

在校正过程中, 首先将通过实验测定一组透射厚度 x 的射束和 y 的数据拟合后得到 X 射线射束和与透射厚度 x 拟合方程(13)式, 即图 1 中 X 射线射束和拟合曲线, 然后用(24)式拟合出等效射束和 y_{eq} , 从而得到修正后的等效 Beer 定律的拟合方程(25)式, 再根据(26)式即可得到拟合的等效单色衰减系数, 对该拟合等效衰减系数卷积反投影法进行图像重构, 即可有效消除 X 射线射束硬化的影响。

3 实验模拟

图 2 为 X 射线 CT 测得的样品孔卡的 CT 图像。ICT 的空间分辨力 ≤ 0.8 mm, 密度分辨率 $\leq 5\%$, 扫描重建图像矩阵 128×128 , 每个投影的采样时间 0.2 s。而所用 X 射线是 120 keV 非严格单色射束, 聚焦斑的直径为 0.8 mm。首先通过 X 射线 ICT 得到 X 射线投影数据, 不进行硬化修正, 直接得到衰减系数, 用该衰减系数直接进行卷积反投影重构, 结果如图 2(a)所示。利用本文提供的上述射束硬化校正的方法对投影图进行预处理校正。计算机模拟处理结果如图 2(b)。

由于对衰减系数信息量进行补偿校正, 等效衰减系数的信息量比较充分, 从图 2(b)可以看出, 图像明显变清晰, 伪影得到有效消除, 效果理想。



Fig. 2 Simulation result of experiment

- (a): Reconstruct result by effect of ray hardening;
(b): Reconstruct result after hardening correction

4 结论

本文提出的 X 射线射束硬化校正, 通过对射束和曲线拟合, 推出等效射束和的拟合计算, 进一步提出了 X 射线修正后等效 Beer 定律拟合方程, 以及等效单色衰减系数拟合值, 该方法有效地消除了射束硬化对图像重建结果的影响, 原理简单, 容易实现, 同时由于拟合值采用最小二乘法拟合, 而最小二乘法拟合值是最小方差无偏估计值, 因此对信息损失很小。

入射强度随能量的分布函数 $I_0(E)$ 与 E 的关系随 X 射线管电压不同而变化, 需要通过实验测定。 $I_0(E)$ 与 E 的关系可参考相关文献[2, 3]。对此, 我们将做进一步的研究。希望本文有助于 X 射线 ICT 的射束硬化校正和优化设计, 提高图象质量。

参 考 文 献

- [1] Krohn Barbara R, Silver Michael D. Materials Evaluation, 1990, 49(10): 1296.
- [2] de Paiva Rogerio Ferreira, Lynch John, Rosenberg Elisabeth, et al. NDT & International, 1998, 31(1): 17.
- [3] PENG Guang-han, YANG Xue-heng, HAN Zhong, et al(彭光含, 杨学恒, 韩 忠, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2005, 25(11): 1880.
- [4] Hanke R, Bobel F. NDT & International, 1992, 25(2): 87.
- [5] PENG Guang-han, YANG Xue-heng, CAI Xin-hua, et al(彭光含, 杨学恒, 蔡新华, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(4): 823.
- [6] Guy M J, Castellano-Smith I A, Flower M A, et al. IEEE, Transaction on Nuclear Science, 1998, 45(3): 1261.
- [7] ZHANG Li-ming, WEI Cai-ping, ZHENG Shi-rong(张李明, 魏彩屏, 郑世荣). Journal of China University of Science and Technology(中国科学技术大学学报), 1996, 26(4): 510.
- [8] PENG Guang-han, CAI Xin-hua, HAN Zhong, et al(彭光含, 蔡新华, 韩 忠, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(9): 1882.

X-Ray Hardening Correction for ICT in Testing Workpiece

PENG Guang-han^{1,2}, CAI Xin-hua¹, HAN Zhong³, YANG Xue-heng³

1. College of Physics and Electronic Science, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, China

2. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, China

3. College of Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China

Abstract Since energy spectrum of X-ray is polychromatic source in X-ray industrial computerized tomography, the variation of attenuation coefficient with energy leads to the lower energy of X-ray radiation being absorbed preferentially when X-ray is transmitting the materials. And the higher the energy of X-ray, the lower the attenuation coefficient of X-ray. With the increase in the X-ray transmission thickness, it becomes easier for the X-ray to transmit the matter. Thus, the phenomenon of energy spectrum hardening of X-ray takes place, resulting from the interaction between X-ray and the materials. This results in false images in the reconstruction of X-ray industrial computerized tomography. Therefore, hardening correction of energy spectrum of X-ray has to be done. In the present paper, not only is the hardening phenomenon of X-ray transmitting the materials analyzed, but also the relation between the X-ray beam sum and the transmission thickness of X-ray is discussed. And according to the Beer law and the characteristics of interaction when X-ray is transmitting material, and by getting the data of X-ray beam sum, the relation equation is fitted between the X-ray beam sum and X-ray transmission thickness. Then, the relation and the method of equivalence are carried out for X-ray beam sum being corrected. Finally, the equivalent and monochromatic attenuation coefficient fitted value for X-ray transmitting the material is reasoned out. The attenuation coefficient fitted value is used for product back-projection image reconstruction in X-ray industrial computerized tomography. Thus, the effect caused by X-ray beam hardening is wiped off effectively in X-ray industrial computerized tomography.

Keywords X-ray; Industrial computerized tomography; Hardening correction; Beam sum

(Received Jun. 26, 2007; accepted Oct. 6, 2007)