

克服厚度对双能量透射图像影响的 数值计算优化方法

原培新 孙丽娜

(东北大学机械工程与自动化学院, 沈阳 110004)

摘要 目前双能量 X 射线图像系统都是通过使用高能和低能透射信号相结合的方法(计算出与有效原子序数相关的 R 值)来识别物质,但物体厚度对双能量透射图像的 R 值有很大影响,即会影响物质分类识别的准确性。为此提出了一种改进的用两种能量的透射信号比来消除物质厚度的影响,并以优化的透射信号估算的面积吸收系数来代替透射信号,用以识别物质的数值计算优化算法,通过实验数据分析和对该算法的评估证明,由于此算法可以大大减小厚度的影响,使误判率减小,从而提高了物质分类识别的准确性。

关键词 双能量 X 射线探测 安全检查 有效原子序数 物质识别 能量分离

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2006)09-1237-05

A Numerical Computing Optimization Method to Overcome the Thickness Effect to Dual-energy Transmission Imaging

YUAN Pei-xin, SUN Li-na

(Mechanical Engineering and Automation Institute of Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract Dual-energy X-ray imaging system combining the high and low transmission signal to serve the method of object classification(calculate R related with effective atomic number) at present. But object 's thickness has great effect on dual-energy transmission imaging. Videlicet, object 's thickness influences the veracity of object classification. This paper put forward an improving numerical optimized method by the ratio of two transmission signal to eliminate the effect of the thickness, with optimized area absorption coefficient transmission signal to replace the transmission signal. This method can weaken the effect of object 's thickness on R , decrease the probability of inaccuracy and improve the veracity of classification by analyzing and evaluating experimental data.

Keywords dual-energy, X-ray detect, security inspection, effective atomic number, object classification, energy selection

1 引言

目前双能量 X 射线图像系统是使用将 T_H (下角 H 代表 high,以下同)和 T_L (下角 L 代表 low,以下同)相结合的方法来识别物质,即

$$R = \ln\left(\frac{T_L}{T_0^L}\right) / \ln\left(\frac{T_H}{T_0^H}\right) \quad (1)$$

R 称作双能量值, T_0^H 和 T_0^L 是在自由空间获得的高能、低能透射信号, T_H 和 T_L 是通过物质后获得的高能、低能透射信号。由于双能量透射技术能提供与有效原子序数相关的信息 R , 因此有效原子序数 Z_{eff} (下角 eff 代表 effective)可通过 R 由方程得到,因为 R 与 Z_{eff} 有一一对应的映射关系,所以无需真的通过 R 计算 Z_{eff} , R 本身就是一个可以决定物质类型的特征值。

基金项目:交通部重点推广项目(200235332106)

收稿日期:2005-04-19 改回日期:2005-10-15

第一作者简介:原培新(1953~)男,教授,博士生导师。1977年获东北工学院机械系矿机专业工学学士学位,1986年获东北工学院力学专业硕士学位。主要研究方向为检测技术、故障诊断,研究成果有公路客运站危险品检查仪、汽车动态轴距差检测仪。E-mail:neusun@126.com

由于这种方法会受到厚度变化的影响,因此将导致透射图像强度的变化,且在一定输入能量 E_{in} 下,总的透射信号是能量范围内透射信号的积分。由于 X 射线的方向不总是垂直于探测器平面,因此定义以下两个坐标系:探测器的坐标系为 (x, y, z) , 物体沿 X 射线方向的坐标系为 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 。为了方便讨论,本文将透射信号改写为

$$T(x, y) = \int_0^{E_m} N(E) e^{\{-d\mu(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})\} P_d(E) E} dE \quad (2)$$

其中 $N(E)$ 为入射的 X 射线光子数, E 为 X 射线光子能量, $P_d(E)$ 为光子的探测概率(下角 d 代表 detect)。 E_m 为第 m 段能量,对于简单的物体,总的线吸收系数为 $\mu(\hat{x}, \hat{y}, E)$, 厚度为 t , 于是式(2)变为

$$T(x, y) = \int_0^{E_m} N(E) e^{-\mu(\hat{x}, \hat{y}, E)t} P_d(E) E dE \quad (3)$$

对于在图像中任意位置 (x, y) 的物体,需分析在给定能量谱线下,透射信号强度和物体厚度的关系。从式(3)中去除空间坐标,即得到

$$T = \int_0^{E_m} N(E) e^{-\mu(E)t} P_d(E) E dE \quad (4)$$

从式(4)可知,总的透射信号强度 T 取决于物体的厚度。虽然双能量 X 射线图像系统不受物质厚度改变的影响,但对于某一特定的物质,输入能量分别为 T_H, T_L , 于是有

$$\left. \begin{aligned} T_H &= \int_0^{E_H} N(E) e^{-\mu(E)t} P_d(E) E dE \\ T_L &= \int_0^{E_L} N(E) e^{-\mu(E)t} P_d(E) E dE \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

从式(5)可以看出,由于求信号强度需积分,因此不可能从上述方程中消去厚度参数。也就是说, R 不仅与物质的原子序数 Z 、原子重量 A 、密度 ρ 有关,也与物质的厚度有关^[1-3]。

2 克服厚度影响的数值计算优化方法

由于上面的方法是用透射信号来识别材料,因而不能消除厚度的影响,本文用两种能量下的透射信号比来消除物质厚度的影响,同时以优化的透射信号估算的面积吸收系数来代替透射信号,用以识别物质。

2.1 透射信号的数值计算方法表达

对于给定的 X 射线源和探测器,式(5)中的入

射 X 射线光子数 $N(E)$ 、X 射线光子能量 E , 光子的探测概率 $P_d(E)$ 都是已知的或是通过计算可以得到的参数。如果让 $K(E) = N(E)EP_d(E)$, 则在特定点的透射信号可写成

$$T = \int_0^{E_m} K(E) e^{-\mu(E)t} dE \quad (6)$$

由于被积函数 $K(E)$ 仅在离散点上已知,所以数字化积分方法只是对定积分的近似估计。

2.2 复化求积公式

进行积分运算时,积分限 $[0, E_m]$ 可以被分成几个小积分段,即在函数线下的区域被积分间隔分成若干个细长条的区域。

$$0 = E_0 < E_1 < \dots < E_M = E_m$$

一旦分割方法被确定,则式(6)变成

$$T = \int_0^{E_m} f(E) dE = \int_0^{E_1} f(E) dE + \int_{E_1}^{E_2} f(E) dE + \dots + \int_{E_{M-1}}^{E_M} f(E) dE \quad (7)$$

其中 $f(E) = K(E) e^{-\mu(E)t}$

求积时,首先在每一个小区间上使用低阶求积公式,然后将其求和值作为整个区间上的积分近似值。

2.3 辛甫森公式

辛甫森公式是一个近似积分,其等于步长(区间间隔)乘以被积函数分别在左边界、中心点、右边界点处的加权平均,即

$$\int_{E_m}^{E_{m+1}} f(E) dE = h \left[\frac{1}{6} f(E_m) + \frac{2}{3} f\left(\frac{E_m + E_{m+1}}{2}\right) + \frac{1}{6} f(E_{m+1}) \right] + \xi(f) \quad (8)$$

其中,光子能量步长 $h = E_{m+1} - E_m$, $\xi(f) = -\frac{(h/2)^2}{90} \times f^{(4)}(\eta)$ 是截断误差。

如果在式(8)中使用相等的子区间来将辛甫森公式求和,则式(8)变成复化辛甫森公式

当 M 为偶数时,

$$T = \frac{h}{6} [f(E_0) + f(E_M)] + 2 \sum_{m=1}^{M/2} f(E_0 + 2(m-1)h) + 4 \sum_{m=1}^{M/2} f(E_0 + (2m-1)h) \quad (9-a)$$

当 M 为奇数时,

$$T = \frac{h}{6} [f(E_0) + f(E_M) + 2 \sum_{m=1}^{(M-1)/2} f(E_0 + 2mh) + 4 \sum_{m=1}^{(M-1)/2} f(E_0 + 2mh)] \quad (9-b)$$

其中 $M = E_{in}/h$ 是子积分段的数目。总的误差是每一子积分段的误差之和,即

$$\xi_M(f) = -\frac{(h/2)^4 E_{in} f^{(4)}(\eta)}{180} \quad (10)$$

通常可以将式(9)写成下面的形式:

$$T \approx \sum_{m=0}^M a_m e^{-\psi_m} \quad (11)$$

其中

$$a_m = \begin{cases} \frac{h}{6} K(E_0), m = 0 \\ \frac{h}{3} K(E_m), 0 < m < M, m \text{ 是偶数} \\ \frac{2h}{3} K(E_m), 0 < m < M, m \text{ 是奇数} \\ \frac{h}{6} K(E_M), m = M \end{cases} \quad (12)$$

$$\psi_m = \mu_i(E_m)t \quad (13)$$

注意,不能用式(11)来计算总的透射信号强度 T 。正相反,只能在特定的能级 E_{in} 下,用测量的 T 值来估计面积吸收参数 ψ_m 。

2.4 用数值计算优化方法来解方程

尽管不能直接解式(13),但通过它可以进行一个很好的判断。如果定义一个目标函数 $\varepsilon(\psi) = [T - \sum_{m=0}^M a_m e^{-\psi_m}]^2$, 则其可用数学语言描绘为:

若已知 $\varepsilon(\psi) = [T - \sum_{m=0}^M a_m e^{-\psi_m}]^2$, 则可找出最优集合 $\psi^* = \{\psi_0, \psi_1, \dots, \psi_M\}$, 使测量的 T 值与用式(11)计算的 T 值之间的误差 ε 最小,即

$$\varepsilon(\psi) = \min [T - \sum_{m=0}^M a_m e^{-\psi_m}]^2 \quad (14)$$

有关横截面积和能级的关系将用作式(14)的约束。在特定的能量范围,由于只有一种效应(X射线照射物体主要发生3种效应)起重要作用,因此可通过分别使用每一种效应所对应的横截面积与能级的关系来得出式(14)所示的约束方程^[4-8]。

$$\begin{cases} \psi_0 \geq \psi_1 \geq \psi_2 \dots \geq \psi_m \geq 0 \\ \psi_m E_m^3 = \psi_{m+1} E_{m+1}^3 & m \leq M_1 (M_1 = 5) \\ \psi_m E_m^2 = \psi_{m+1} E_{m+1}^2 & M_1 < m \leq M_2 (M_2 = 15) \\ \psi_m = \psi_{m+1} & M_2 < m \leq M \end{cases} \quad (15)$$

其中 M_1 和 M_2 是定义能级区域的两个特定值。本文根据经验,选择 $M_1 = 5, M_2 = 15$ 。当输入电压为 140KeV、等间隔电压为 5KeV 时, M 等于 30。

2.5 算法

数值计算的优化方法总结如下:

- (1) 输入式(11)中的系数 $\{a_m\}$;
- (2) 输入每一个物体在低、高能时的灰度级;
- (3) 让 $T = T_L$, 通过解式(14)求 $\psi_m, m = \{0, 1, 2, \dots, M\}$;
- (4) 让 $T = T_H$, 通过解式(14)求 $\psi_n, n = \{0, 1, 2, \dots, N\}$;
- (5) 用公式 $R = \psi_L/\psi_H$ 来计算双能量值,其中 ψ_L 是在特定的低能量 E_L 下的面积吸收系数, ψ_H 是在特定的高能量 E_H 下的面积吸收系数。

3 改进方法评估^[9]

3.1 判别式描述

如果先使用双能量值作为3种板材(分别为有机玻璃板、碳化硅和铝板,分别代表有机物、混合物、无机物)的分类特征值,然后估计其分类的错误概率,则在这种情况下,最小错误概率的贝叶斯判别定理是:如果 $P(c_i|s) > P(c_j|s)$, 那么就将其判定为 c_i 类的物质,其中 $P(c_i|s)$ 称作在给定观测值 s 时, c_i 类物质的后验概率。

为了对此方法的可靠性进行评估,必须估计双能量方法的概率密度函数,可做如下的假设:

- (1) 个人的行李包裹中的物质是互不相同的;
- (2) 特定包裹中的物质通常是互不相同的;
- (3) 对于特定的行李包裹,其物质的位置、方向和厚度是随机的。

所有上面的因素都将影响透射信号的强度和双能量值,但由于根据上面的假设,可以将标准正态分布作为概率密度函数,因此,判别式可以被简化成

$$g_i(s) = -\frac{(s - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2} + \ln(P(c_i)) > g_j(s) \quad (16)$$

其中 $g_i(s)$ 称作判别式函数, $P(c_i)$ 是 c_i 类物质的先验概率, μ_i 和 σ_i^2 是 c_i 类物质的均值和方差。如果所有类物质的先验概率 $P(c_i)$ 都相同,则上面的判别式可进一步简化成

$$g_i(s) = -\frac{(s - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2} > g_j(s) \quad (17)$$

3.2 错误概率的比较

当使用原有方法和数字化最优化方法计算出的 3 种板材的双能量值,则它们各自的错误概率的评估结果见表 1。其中变量 σ^2 是 3 种板材双能量值标准正态分布的标准差的平方^[2]。

表 1 3 种材质的双能量值

Tab. 1 dual-energy for three kinds of materials

材质	$R = \frac{\log(T_L/T_0^L)}{\log(T_H/T_0^H)}$		$R = \frac{y(70\text{keV})}{y(140\text{keV})}$	
	均值	方差	均值	方差
有机玻璃	1.212	0.000 819 6	1.220 167	0.000 153 76
碳化硅	1.347 429	0.006 025	1.351 286	0.001 225
铝板	1.546 6	0.007 523 8	1.539 857 14	0.000 991 8

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (R_i - \mu)^2 \quad (18)$$

其中 N 是实验次数 R_i 是第 i 次计算得到的双能

量信息值。

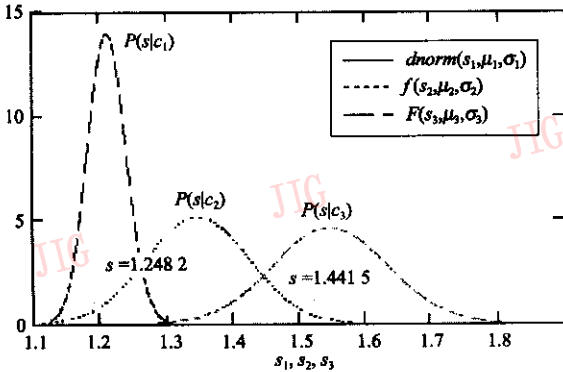
3 种板材的双能量方法的概率密度函数如图 1 所示。

通过对表 1 的数据做进一步分析可得 $g_1(1.248 2) = g_2(1.248 2)$ 和 $g_2(1.441 5) = g_3(1.441 5)$, 然后就可使用式 (17) 中的判别式来对板材进行分类: 如果 $s > 1.441 5$, 则 s 为 c_3 类物质(铝), 如果 $s < 1.248 2$, 则 s 为 c_1 类物质(有机玻璃), 否则 s 为 c_2 类物质(碳化硅)。

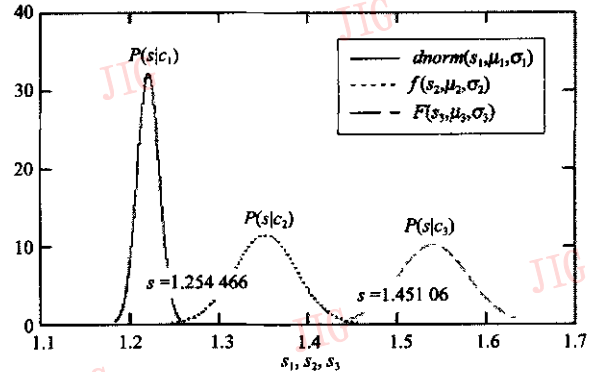
使用式 (1) 的双能量方法的错误概率为

$$P_{\text{error}} = 1 - \frac{1}{3} \left[\int_{-\infty}^{1.2482} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{(s-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} ds + \int_{1.2482}^{1.4415} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-\frac{(s-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} ds + \int_{1.4415}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_3} e^{-\frac{(s-\mu_3)^2}{2\sigma_3^2}} ds \right]$$

$$= 1 - \frac{1}{3} (0.897 + 0.887 - 0.101 + 1 - 0.113) = 14.3\%$$



(a) 原方法的概率密度函数



(b) 改进算法的概率密度函数

图 1 3 类物质的概率密度函数及 3 种材料的区分边界

Fig. 1 Probability density functions of three dual-energy classes and the discriminant boundaries for three kinds materials

使用优化方法的概率密度函数和 3 种板材的判别边界如图 1 所示。其判别规则和前面相似, 即, 如果 $s > 1.451 06$, 则 s 为 c_3 类物质(铝), 如果 $s < 1.254 466$, 则 s 为 c_1 类物质(有机玻璃), 否则 s 为 c_2 类物质(碳化硅)。

使用数字化最优化双能量方法的错误概率为

$$P_{\text{error}} = 1 - \frac{1}{3} \left[\int_{-\infty}^{1.2544} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{(s-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} ds + \int_{1.2544}^{1.451} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-\frac{(s-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} ds + \int_{1.451}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_3} e^{-\frac{(s-\mu_3)^2}{2\sigma_3^2}} ds \right]$$

$$= 1 - \frac{1}{3} (0.997 + 0.998 - 0.002 837 + 1 - 0.012) = 2\%$$

4 结 论

对于 3 种相同的板材, 与直接使用式 (1) 的双能量方法相比较, 本文的数值计算优化方法是采用两种能量下的透射信号比来消除物质厚度影响, 同时以通过复化辛甫森公式优化的透射信号估算的面积吸收系数来代替透射信号, 用以识别物质。用这

种方法识别物质的错误概率更低,因为它是通过减少错误率来提高物质分类的准确性。上面的比较仅是采用3类物质,但实践证明,用任意的物质进行比较分析都可以得到相同的结论。这种方法不仅提高了物质识别的精度,而且也提供了一种新的设计双能量图像系统的方法。

计算物质的双能量值 R 时,要用到物体的真实灰度级,所谓的物体的真实灰度级就是当一个物体被置于空中时,若没有其他的背景物体干扰,则测得的灰度级就是物体的真实灰度级。例如实际工作中要对行李包裹进行探测,可是由于旅客行李包裹中的物体非常多,包裹中的物体又以任意方向摆放,互相遮挡,而且违禁品与无害的物品混杂在一起,这使得探测工作非常困难,之所以在识别物质的特性过程中去除遮挡非常重要,是因为去除了遮挡效应的影响,就可以得到物体的真实灰度级。如今有关求解物体真实灰度级的方法的研究也取得了很大成果,基本可以解决重叠物质的遮挡问题。

在使用双能量透射技术确定了 R 值后,通过 R 值就可以将有机物从无机物和金属中分离出来,但仍不能将无害的有机物和违禁的物质分离出来,由于这些物质的密度不同,因此可用散射系统测量康普顿散射效应,以便通过散射技术计算出与密度相关的信息,这样密度不同的物质就可以被区分开来,可见最终识别物质必须将双能量透射技术与散射技术相结合才能更加准确地识别物质,目前这项工作正在进行中。

参考文献(References)

- 1 Xie W. Simulation of X-ray imaging systems for luggage inspection [D]. Blacksburg Virginia , USA :Virginia Polytechnic Institute and State University ,1995.
- 2 Liu Wen-ye. Automatic detection of Elongated objects in X-ray images of luggage [D]. Blacksburg Virginia , USA : Virginia Polytechnic Institute and State University ,1997.
- 3 Bjorkholm P J , Wang T R. Explosives detection using three dimensional computer assisted image analysis[J]. Proceedings of SPIE. ,1992 **1824** :122 ~ 126.
- 4 Fainberg A. Explosive detection for aviation security[J]. Science , 1992 **255**(3) :1531 ~ 1537.
- 5 Zou S. A sensor-fusion technique for explosive detection[D]. Blacksburg , Virginia , USA : Virginia Polytechnic Institute and State University ,1998.
- 6 Alvarez R E. Energy-selective reconstruction in X-ray computerized tomography [J]. Physical Medical Biology , 1976 , **21** (5) : 733 ~ 744.
- 7 Sun Li-na. Study on object classification in X-ray security inspection equipment[D]. Shenyang : Nortneastern University , 2003. [孙丽娜. X射线安检设备中物质分类识别方法的研究[D]. 沈阳 :东北大学 2003.]
- 8 Macdonald Richard D R. Design and implementation of a dual-energy X-ray imaging system for organic material detection in an airport security application[J]. Machine Vision Application in Industrial Inspection ,2001 **43**(1) 31 ~ 41.
- 9 Liu Qiang. The utility of X-ray dual-energy transmission and scatter technologies for illicit material detection[D]. Blacksburg Virginia , USA :Virginia Polytechnic Institute and State University ,1999.