

闪光照相底片成像非线性校正技术研究

管永红^{1,2} 王润生² 施将君¹

(1 流体物理研究所 四川绵阳 919 信箱 105 分箱, 四川 621900)

(2 国防科技大学 ATR 实验室, 湖南长沙 410073)

摘 要 介绍了利用黑密度~穿透光程关系曲线对底片接收方式下的闪光照相图像进行非线性校正的方法. 根据闪光照相成像原理, 在光场均匀、散射均匀的条件下, 图像的黑密度是照相客体的穿透光程的单调函数. 当有一定的散射分布时, 相当于校正图像中叠加了一本底成分, 利用先验知识可以扣除. 因此可以用黑密度~穿透光程关系曲线进行闪光照相图像的非线性校正. 利用本方法对一三棱柱照相客体的图像进行了非线性校正, 处理结果证实了该方法的有效性.

关键词 闪光照相; 图像处理; 非线性校正

中图分类号 TP911 **文献标识码** A

0 引言

在闪光照相实验中通常使用底片作为接收介质^[1], 这类测量中常遇到的一类问题是底片信息接收方式下的非线性校正问题. 在传统的增感屏-底片接收方式中, 由于底片成像过程为一非线性过程, 因此照相过程中底片接收的能量与相应的黑密度值之间为一复杂的函数关系^[2]. 一般处理方法是根据底片成像特性曲线(也称 H&D 曲线)来消除底片非线性影响. 国内陈书海等人认为底片成像中其成像特性曲线为对数关系^[3], 对于闪光照相系统, K. H. Hanson 使用了线性关系的成像特性曲线^[4]. 但是在实际工作应用中发现, 实际闪光照相系统的成像特性曲线远比上述关系复杂. 而在闪光照相中, 由于 X 光源参数(如剂量、分布等)的重复性无法保证以及照射量难以准确测量等多方面的原因, 系统的成像特性曲线一般无法得到. 因此如何解决闪光照相中底片接收方式引入的非线性效应成为闪光照相实验信息处理中的首要问题. 本文介绍一种基于黑密度~穿透光程关系曲线($D \sim L$ 曲线)的非线性校正方法.

1 闪光照相基本原理

X 光照相是一门古老的技术, 自 1895 年伦琴发现 X 光能使底片感光开始, 第二年 X 光就应用于人体病情的检查, 如今 X 光照相已经在无损检测方面获得了广泛的应用. 闪光照相使用的 X 光光源有以下几个特点: 1) X 光能量比较高, 一般 X 光光子能量在 MeV 级别以上; 2) X 光持续时间较短, 一般在数十纳秒. 同一般低能 X 光一样, 闪光照相使用的 X 光穿透物质时符合指数衰减规律, 即

$$X(E) = X_0(E) \exp[-\mu(E)\rho l] \quad (1)$$

式中: X 表示透射 X 光照射量, 一般成为直穿照射量, 单位 C/Kg; E 表示入射 X 光光子能量, 单位 eV; X_0 表示入射 X 光照射量, 单位 C/Kg; μ 表示被穿透物质的质量衰减系数, 单位 Kg/m²; ρ 表示被穿透物质的密度, 单位 Kg/m³; l 表示 X 光穿透物质的厚度, 单位 m.

但是一般闪光照相系统使用的光源不是严格单能 X 光源, 而是具有一定的能谱分布^[5,6]. 此时可以使用“等效单能模型”来描述 X 光穿透物质时的衰减规律^[7,8], 即

$$X = X_0 \exp[-\mu_{eq}\rho l] \quad (2)$$

式中: μ_{eq} 表示被穿透物质的等效单能质量衰减系数, 单位 Kg/m², 式(2)(或式(1))表明: 穿透物质后的 X 光携带有被照相物体的质量吸收系数、密度等物质内部的信息, 因此可以用于照相客体相关特性的诊断.

闪光照相测量是依据闪光照相接收图像上的黑密度分布, 提取出照相客体的相关信息, 如界面位置、空间密度分布等. 但是由于实际测量中使用底片接收方式得到的信息不是直接的直穿照相量信息, 而是底片的黑密度分布, 即

$$D(x, y) = f\{X(x, y)\} \quad (3)$$

式中: f 表示底片上某点接收的照射量与底片黑密度之间的函数关系. 但是在 X 光成像系统(无论是低能 X 光照相还是闪光照相), 接收系统接收的信号不仅仅是直穿照射量信息, 同时还有散射照相量信息^[9], 再考虑到入射至照相客体的 X 光光强具有一定的空间分布, 因此完整的闪光照相成像模型应表示为

$$D(x, y) = f\{X_0(x, y) \exp[-\int_L \mu_{eq}(x, y, z) \cdot \rho(x, y, z) dl] + X_s(x, y)\} \quad (4)$$

式中:Z 表示 X 光光线方向经过照相客体的长度,单位 m; $X_0(x,y)$ 表示底片接收的散射成分,单位 C/Kg.

2 底片成像的非线性校正技术

2.1 均匀光场成像条件下的非线性校正

从式(4)可以看出,闪光照相底片黑密度不仅与照相客体对应 X 方向上的穿透光程有关,还与 X 光光强分布、散射分布等诸多因素相关. 在实际闪光照相图像处理工作中由于上述因素的引入使闪光照相底片图像的分析变得异常复杂,为了简化问题,常常引入以下两个假定:

1) X 光光场为均匀分布,即

$$X_0(x,y) = \text{Const} \tag{5}$$

2) 散射照射量分布为均匀分布,即

$$X_s(x,y) = \text{Const} \tag{6}$$

这种假设在照相涉及的 X 光光场范围较小、底片接收平面上接收的直穿照射量远大于散射照射量时是合适的. 这样,式(4)可以改写为

$$D(x,y) = g \left\{ \int \mu_{\text{eq}}(x,y,z) \rho(x,y,z) dl \right\} \tag{7}$$

式中:g 表示 X 光方向上照相客体的穿透光程与底片上对应点之间的函数关系. 式(7)中的函数关系 g 又称为 D ~ L 关系曲线.

式(7)表明,在满足 1)、2) 两个条件下,底片图像的黑密度分布仅仅与照相客体沿 X 光方向上对应的穿透光程有关. 也就是说,在实际闪光照相试验中如果同时放置一些已知的照相样品,如台阶、三角块等与待照相客体同时成像,这样就可以利用从已知照相样品中提取的 D ~ L 曲线对照相客体进行校正,得到照相客体沿 X 光方向上的穿透光程分布,从而确定照相客体相关的边界、面密度分布等相关信息.

2.2 非均匀光场成像条件下的非线性校正

从 2.1 节可以看出,利用测试样品可以避免高能 X 光照相图像非线性校正中对底片响应特性曲线的需求,但是这种方法有以三个基本要求:①要求光场的均匀;②要求散射的均匀;③同一张底片上各点具有相同的响应特性.

这三条要求对于一般的低能 X 光照相是容易做到的,但是对于本文所讨论的闪光照相,严格满足这三个条件有一定的难度,虽然条件②、③可以通过适当的照相几何布局以及提高底片的处理工艺来近似满足,但是条件①往往很难得到满足.

注意到,当照相图像上的散射为均匀分布以及同一底片具有相同的响应特性时,底片图像的黑密度分布仅同直穿照射量有关,以下用上标 o 表示照相客体对应的相关物理量,用上标 T 表示已知样品

对应的相关物理量,这样式(7)可分别写为

$$D^o(x,y) = h \left\{ X_0^o(x,y) \exp \left[\int \mu_{\text{eq}}^o(x,y,z) \rho^o(x,y,z) dl \right] \right\} \tag{8}$$

式中:h 表示直穿照相量与底片黑密度函数关系.

$$D^T(x,y) = h \left\{ X_0^T(x,y) \exp \left[\int \mu_{\text{eq}}^T(x,y,z) \rho^T(x,y,z) dl \right] \right\} \tag{9}$$

对式(8)、(9)稍加改写可得

$$D^o(x,y) = g \left\{ \exp \left[\int \mu_{\text{eq}}^o(x,y,z) \rho^o(x,y,z) dl \right] \right\} \tag{10}$$

$$D^T(x,y) = g \left\{ \exp \left[\int \mu_{\text{eq}}^T(x,y,z) \rho^T(x,y,z) dl \right] \cdot X_0^T(x,y) / X_0^o(x',y') \right\} \tag{11}$$

式中 $X_0^o(x',y')$ - 映射过程中照相样品待测点对应入射 X 光的照射量. 令

$$C(x,y) = \ln \left[X_0^T(x,y) / X_0^o(x',y') \right] \tag{12}$$

则式(11)成为

$$D^T(x,y) = g \left\{ \exp \left[\int \mu_{\text{eq}}^T(x,y,z) \rho^T(x,y,z) dl + C(x,y) \right] \right\} \tag{13}$$

以 $\int \mu_{\text{eq}}^T(x,y,z) \rho^T(x,y,z) dl$ 为自变量,式(13)可以通过对自变量平移的方式变成

$$D^T(x,y) = g' \left\{ \int \mu_{\text{eq}}^T(x,y,z) \rho^T(x,y,z) dl \right\} \tag{14}$$

由于函数 g' 是通过函数 g 平移而来,因此可以利用式(14)对式(10)进行校正. 实际上,对于式(10)、(13),当

$$D^o(x,y) = D^T(x,y) \tag{15}$$

时,有

$$\int \mu_{\text{eq}}^o(x,y,z) \rho^o(x,y,z) dl = \int \mu_{\text{eq}}^T(x,y,z) \rho^T(x,y,z) dl + C(x,y) \tag{16}$$

也就是说,非均匀光场的影响相当于在穿透光程上叠加了一本底成分,该本底可由式(12)得出. 值得注意的是,如果光场处处不等,叠加本底是非均匀的,但是由于照相样品以及测试样品的存在以及高能 X 光照相系统的复杂性,该本底的测量有很大的实际困难,因此可将条件适当放宽为:光场在照相样品与测试样品范围内局部均匀. 显然,上述条件相对于“光场均匀”条件而言宽松了很多,此时该本底成分为一常量.

为了验证分析的正确性,对某闪光照相图像利用上述校正方法进行非线性校正处理. 该闪光照相光源在视场范围内为非均匀分布,但是分布曲线较为平坦. 底片接收的光场分布图像剖面线如图 1. 实验系统照相布局示意图如图 2,图 3 为照相客体的原始照相图像,该照相客体为一等腰三角块物体,沿 X 光方向上的最大厚度为 70 mm,图 4 为同时成像的已知样品,该样品为一直角三角块. 从已知样

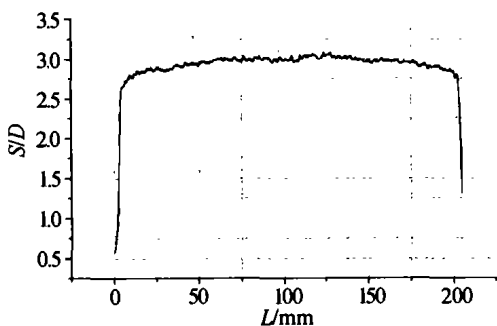


图1 X光光场分布曲线
Fig. 1 X-ray distribution

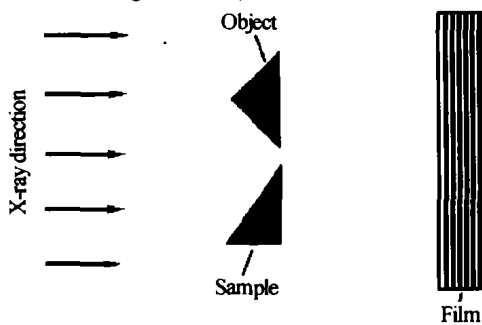


图2 照相实验布局示意图
Fig. 2 Arrangement of experiment



图3 客体照相图像
Fig. 3 Image of object



图4 三棱柱样品照相图像
Fig. 4 Image of triangle sample

品中提取的 $D \sim L$ 曲线如图 5。采用本文介绍的校正方法得到的照相客体校正图像如图 6。经过校正后得到的照相客体沿 X 光方向上厚度分布关系曲线如图 7 中粗实线所示,图 7 中细实线为真实的厚度分布关系曲线。图 7 中两者的一致性说明了本文

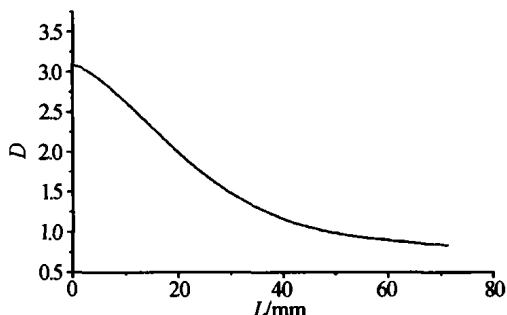


图5 从三棱柱样品图像上提取的 $D \sim L$ 曲线
Fig. 5 $D \sim L$ curve from triangle sample's image



图6 经过校正的客体照相图像
Fig. 6 Object's image processed by nonlinear correction

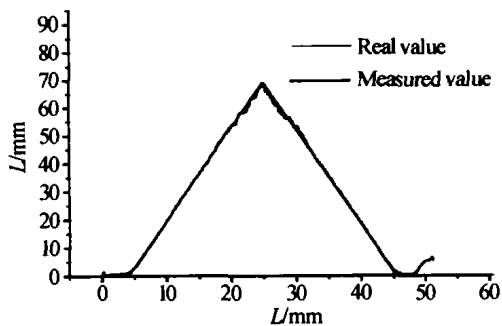


图7 校正后的厚度分布曲线
Fig. 7 Thickness of object obtained by nonlinear correction

使用校正方法的有效性。

3 结论

为了解决闪光照相中无法给出相应底片成像特性曲线从而无法进行非线性校正的困难,本文提出利用黑密度~穿透光程曲线进行照相图像的非线性校正工作。该方法具有以下的特点:1)避免了对底片成像特性曲线的要求;2)由于测试样品与照相样品同时成像,保证了校正结果的准确性;3)适当地对曲线进行技术处理就可以用于非均匀光场的非线性校正工作。

参考文献

- 1 周俸才,管永红. 闪光 X 射线照相系统调制传递函数测量. 光子学报. 2001,30(2):218~223
Zhou F C, Guan Y H. *Acta Photonica Sinica*, 2001,30(2): 218~223
- 2 Muller K H. Collimation techniques for dense object flash radiography. *Proc SPIE*, 1984,491:130~136
- 3 陈书海. 去除系统模糊的图像复原方法. 自动化学报, 1996,12(4):423~425
Chen S H. *Acta Automatica Sinica*, 1986,12(4):423~425
- 4 Hanson K M. Tomographic reconstruction of axially symmetric objects from a single radiograph. 16th International congress on high speed photography and photonics. *Proc SPIE*, 1984,491:180~187
- 5 刘军,崔蔚,施将君,等. 影响 X 光源特性的参数研究. 光子学报,2005,34(2):209~213
Liu J, Cui W, Shi J J, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005,34(2):209~213
- 6 程树英,沈鸿元,陈美峰. 面光源对人肺组织中光能分布的影响. 光子学报,2003,32(10):1250~1253
Chen S Y, Shen H Y, Chen M F. *Acta Photonica Sinica*, 2003,32(10):1250~1253
- 7 McCullough E C, Baker H L, Houser O W, et al. An evaluation of the quantitative and radiation features of a scanning X-ray transverse axial tomograph: The EMI scanner. *Radiat Phys*, 1974,111(3):709~715
- 8 McCullough E C. Photon attenuation in computer tomography. *Med Phys*, 1975,2(6):307~320

9 吴世法. 近代成像技术与图像处理. 北京:国防工业出版社,1997. 13 ~ 15

Wu S F. Modern imaging techniques and image processing. Beijing: National Defense Industry Press, 1997. 13 ~ 15

Nonlinear Correction Technique for Radiography Image

Guan Yonghong^{1,2}, Wang Runsheng², Shi Jiangjun¹

1 *Institute of Fluid Physics, P. B. 919-105, Mianyang 621900*

2 *National Laboratory of ATR, National University of Defense Technology, Changsha 410073*

Received date:2004-07-09

Abstract Principle of nonlinear correction for radiographic image by optic density vs. path length curve was introduced. By the principle of radiography, the function of the optic density and the path length was monotonous on conditional that the X-ray radiation and the scatter distribution were regular. So the optic density vs. path length curve could be used to correct the radiographic image. A background was added on the corrected image when the scatter distribution was non-regular. A radiographic image of triangle object was corrected using this method, and the results confirmed the method.

Keywords Flash X-ray radiography; Image process; Nonlinear correction



Guan Yonghong was born in Jiangxi, China, on July 1972. He received the B. S. degree from Nanchang University, Jiangxi, China, in 1995, and the M. S. degree from postgraduate school of China Academy of Engineering Physics in 1997. His research interesting area is image process for radiography.