

文章编号:1004-4213(2010)04-0719-4

高能闪光照相密度测量的 LEPM 方法*

管永红, 景越峰, 肖智强

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要:研究了利用高能闪光照相方法实现密度分布测量的技术. 根据闪光照相投影成像原理, 将成像过程中的非线性成像因素看成一个综合性的非线性算子, 利用先验测量的方法该非线性算子的响应曲线, 利用该曲线校正成像图像得到待测客体的光程分布图像. 采用以最小误差为重建准则的代数重建法, 从光程分布图像中重建出照相客体的线吸收系数分布. 最后利用相对等效质量吸收系数以及客体总质量不变的约束条件, 获得照相客体的空间密度分布. 在高压闪光照相实验平台上进行了静态客体的密度测量实验, 测量的均方根误差约为 10%.

关键词:高能闪光照相; 密度测量; 图像处理; LEPM 方法

中图分类号: TP911

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103904.0719

0 引言

高能闪光照相是一项利用高能 X 光的强穿透能力及其与物质相互作用的性质, 根据成像平面上 X 光能量分布对客体内部结构进行定量测量的测试技术. 利用高能闪光照相测量客体飞层界面位置及空间密度分布数据对研究客体在爆轰过程中的压缩行为具有重要意义^[1-2]. 美国、法国、俄罗斯等建立了一系列的高能闪光照相实验平台, 获得了高质量的闪光照相实验图像^[3-5]. 为了获得更高精度的闪光照相密度测量数据, 美国正斥巨资建立质子闪光照相系统以期获得误差小于 1% 的客体密度测量数据^[6].

在建立高性能硬件平台的同时, 各国也研制了有针对性的密度测量方法, 该技术具有代表性的方法是洛斯阿拉莫斯实验室在解决闪光照相密度重建问题时采用的 BIE 方法^[7-8]以及利弗莫尔实验室提出的 HADES-CCG 方法^[9-10]. 某直线感应电子加速器的建成为我国的高能闪光照相密度测量研究提供了一个良好的实验平台^[11]. 本文根据该实验平台图像的特点研究了一种密度测量方法, 该方法首先将高能闪光照相成像过程中的一些非线性成像因素等效成一非线性标量算子, 通过实验的方法测量出该算子进行实验图像的非线性校正, 然后根据图像噪声特性选用最小残差准则进行迭代重建的方法提取闪光照相密度数据.

1 闪光照相密度测量原理

高能闪光照相系统成像示意图如图 1. 经高能

电子加速器加速的电子轰击到一片由高原子序数材料制成的转换靶后发生韧致辐射产生高能 X 光, 高能 X 光经过准直后穿过照相物体(客体)在底片上成像. 由于客体在照相时一般处于爆轰过程中, 因此照相系统中还有一定的防护设施.

与一般的无损检测系统不同, 高能闪光照相中所研究的客体一般具有高密度、大光程以及瞬态过程的特性, 要求高能闪光照相系统应具有 X 光光子能量高(达数兆伏级别)、剂量大(数百伦琴)以及光源持续时间短(数十个纳秒)等特点^[12-13]. 在高压闪光照相中, 虽然客体处于爆轰压缩的高速运动过程, 但是由于 X 光持续时间特别短(数十纳秒), 在此时间内客体的压缩运动位移及密度变化非常小, 在图像上产生的运动模糊相对于成像系统的模糊可以忽略不计, 因此可以认为在 X 光持续时间内的客体处于静止状态.

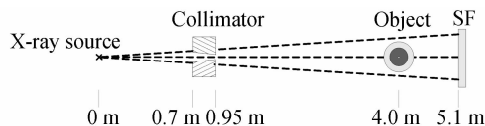


图 1 闪光照相系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of flash radiographic system

考虑到 X 光在穿透物质时发生的散射效应、能谱硬化效应以及成像系统的响应, 并对能谱问题做单能谱近似后, 闪光照相图像的成像过程可以写为 $D(x, y) = f\{[X_0 \exp[-\int_z \mu_{eq}(x, y, z) \cdot$

$$\rho(x, y, z) dz] + X_s(x, y)\} + n(x, y) \quad (1)$$

式中: $D(x, y)$ 为底片图像黑密度分布; f 为底片响应曲线, 即 $H \& D$ 曲线; X_0 为入射至客体前的 X 光剂量; $\mu_{eq}(x, y, z)$ 为客体在 (x, y, z) 位置上的等效质量吸收系数; $\rho(x, y, z)$ 为客体在 (x, y, z) 位置上的密度; $X_s(x, y)$ 为底片 (x, y) 位置上的散射照射量;

* 国防科技基础研究基金(26020401)资助

Tel: 0816-2484121

Email: ifp_gyh@163.com

收稿日期: 2009-06-29

修回日期: 2009-08-10

$n(x, y)$ 为底片 (x, y) 位置上的噪音分布.

从式(1)可以看出,闪光照相图像黑密度分布与闪光照相客体的空间密度分布为一复杂的非线性关系,直接利用上式进行密度测量必须解决底片成像的非线性校正、散射的扣除、CT重建、质量吸收系数的扣除以及消噪音等问题.

2 闪光照相非线性成像的校正

由于涉及的成像因素过多,根据式(1)逐项进行反演得到客体的空间密度分布难度太大.为此,需要根据实际情况对上式进行一些简化,首先考虑散射.闪光照相全系统的数值模拟结果表明:当在成像系统中使用陡坡准直器时,散射较小且分布较为均匀;在客体的总质量不变的条件下,散射成分对客体结构的变化不敏感.图2是利用粒子输运软件对法国实验客体(French Test Object, FTO)在使用陡坡准直器成像时图像平面散射分布的计算结果(为了更好地与实际照相系统穿透能力匹配,试验中将外层的铜材料换成了铝材料).从图中可以看到,相对于直穿成分,散射较小且分布较为均匀.图2(b)是客

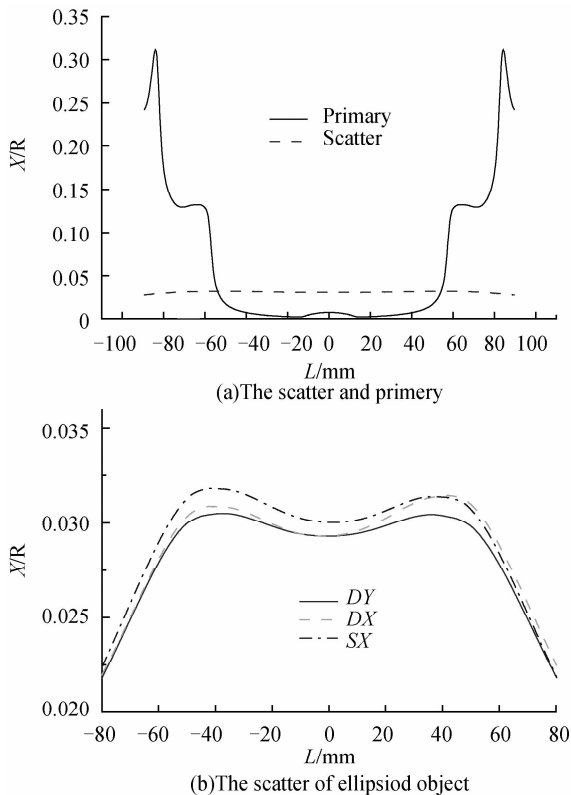


图2 FTO的散射与直穿成分的比较
Fig.2 The scatter and primery of FTO

体在总质量不变的条件下,形状由球形变化为椭球形时相应的散射计算结果.图中DX为椭球客体赤道位置的散射分布,DY为椭球客体两极方向上的散射分布,SX为球形客体赤道方向上的散射分布.从图中可以看到,尽管客体形状有所改变,但是与直

穿信号相比,散射变化小于0.2%.鉴于此,可以将散射看成为一固定常数.

在散射为一固定常数的条件下,式(1)可以改写为

$$D(x, y) = g\left\{-\int_z \mu(x, y, z)\rho(x, y, z)dz\right\} + n(x, y) \quad (2)$$

g 为表征照相客体光程与图像黑密度之间关系的算子.特别应该指出的是,式(2)中的关系曲线是整个照相系统的非线性成像关系曲线,是底片的成像关系($H\&D$ 曲线)、散射、能谱硬化等许多物理关系的综合,称为 $D-L$ 曲线^[14].通过合理的静态实验可以测量出照相系统的 $D-L$ 曲线,静态实验需要满足:1)照相布局能够满足散射较小且基本均匀的条件;2)相同的照相布局;3)相近结构的客体.

3 高能闪光照相密度测量原理

为了表述方便,将式(2)写成矩阵形式,即

$$D = g\{H[\mu_{eq}^T \rho]\} + n \quad (3)$$

在实际测得的结果中发现, $D-L$ 关系曲线(或称算子)具有单调且平滑的特性,其逆算子 g^{-1} 存在,因此式(3)可以利用 g^{-1} 进行校正,经过校正的成像公式可以写为

$$P = Hx + n' \quad (4)$$

考虑到该算子在小范围内可以近似认为是线性的,同时噪音的起伏一般较小(处于算子 g 的线性近似范围),因此 n' 与 n 同样有零均值泊松分布的特性,即

$$\|n'\| = 0 \quad (5)$$

式(4)可以利用代数法(Algebraic Reconstruction Techniques, ART)进行迭代重建.在ART重建中,设一迭代的中间过程为 x^n ,那么迭代的剩余向量为

$$R = P - Hx^n \quad (6)$$

即

$$R = Hx - Hx^n + n' \quad (7)$$

当 $x^n = x$ 时,结合式(5)有

$$\|R\| = 0 \quad (8)$$

实际闪光照相图像重建中,由于图像中含有许多误差因素,更为现实的情况是重建迭代过程的剩余向量达到极小值,因此ART重建的主准则可以选为

$$\|R\| = \min \quad (9)$$

ART重建结果可以写为

$$x = \mu_{eq}^T \rho \quad (10)$$

为客体质量吸收系数与密度之积,因此需要对重建结果进行质量吸收系数扣除.由于闪光照相系统能谱测量的困难性,测量的等效质量吸收系数存

在较大的误差,实际处理中本文利用相对等效质量吸收系数以及附加质量守恒约束来扣除等效质量吸收系数。

对重建结果稍加改写,有

$$\mathbf{x} = \frac{\mu_{\text{eq}}^{\text{Fe}} \mu_{\text{eq}}^{\text{T}} \boldsymbol{\rho}}{\mu_{\text{eq}}^{\text{Fe}}} \quad (11)$$

式(11)中 $\frac{\mu_{\text{eq}}^{\text{T}}}{\mu_{\text{eq}}^{\text{Fe}}}$ 为相对等效质量吸收系数,可以根据不同材料事先测量得到^[15],因此式(11)又可写为

$$\mathbf{x}' = \mu_{\text{eq}}^{\text{Fe}} \boldsymbol{\rho} \quad (12)$$

在照相实验过程中,虽然物体的各个飞层经历了各种物理变化,如压缩(或膨胀),但各飞层的总质量没有变化,即照相实验时刻飞层的总质量和照相前的飞层质量相等,即有

$$\sum \mathbf{x}' \Delta v = \sum \mu_{\text{eq}}^{\text{Fe}} \boldsymbol{\rho} \Delta v \quad (13)$$

即

$$\mu_{\text{eq}}^{\text{Fe}} = \frac{\sum \mathbf{x}' \Delta v}{M} \quad (14)$$

式中 $M = \sum \boldsymbol{\rho} \Delta v$ 为客体质量。将式(14)代入式(13)中稍加整理,有

$$\boldsymbol{\rho} = \frac{M}{\sum \mathbf{x}' \Delta v} \mathbf{x}' \quad (15)$$

这样就得到重建的密度分布。

闪光照相图像的密度测量过程共 6 步:第一步,在照相之前对照相客体结构进行预估,并根据预估结果设计一个尽可能相似(质量、尺寸)的已知客体;第二步,对已知客体进行成像,从已知客体的照相图像中提取出 $D-L$ 曲线;第三步,对需要测量的客体进行成像,得到待测客体图像;第四步,利用从已知客体图像中提取的 $D-L$ 曲线对待测客体图像进行非线性校正;第五步,对待测客体图像的非线性校正结果进行 ART 迭代重建;第六步,对迭代重建结果进行质量约束,扣除等效质量吸收系数,从而得到待测客体密度分布。

本文中的密度测量方法可以用图 3 所示的框图

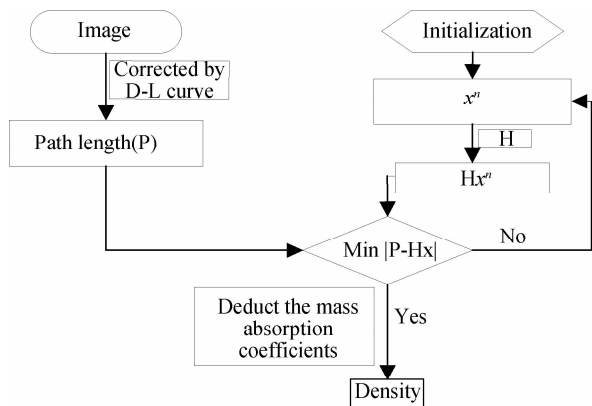


图 3 LEPM 密度测量方法框图

Fig. 3 Schematic diagram of LEPM

表述。在 ART 重建中使用了最小误差准则以及重建时采用的是对平行于 X 光方向上的断面进行逐个重建的方法,该方法在每个断面上具有最小误差的特性,因此被称为最小误差断面匹配法(Least Error Profile Match, LEPM)

4 LEPM 密度重建结果

为了验证该测量方法,本文在高能闪光照相实验平台上进行了 FTO 客体的测量实验,实验图像及密度测量结果如图 4,更多的实验结果见表 1。表中使用平均相对误差以及均方根误差分别为

$$\Delta \rho_1 = \frac{\sum_{(x,y) \in C} |\rho(x,y) - \rho_r(x,y)|}{N \rho_r(x,y)} \times 100\% \quad (16)$$

$$\Delta \rho_2 = \frac{1}{N} \sqrt{\frac{\sum_{(x,y) \in C} |\rho(x,y) - \rho_r(x,y)|^2}{\rho_r^2(x,y)}} \times 100\% \quad (17)$$

式中: $\rho(x,y)$ 为 (x,y) 点的密度测量值 (g/cm^3); $\rho_r(x,y)$ 为 (x,y) 点的密度真实值 (g/mm^3); C 为误差统计区域; N 为误差统计区域的数据点数。

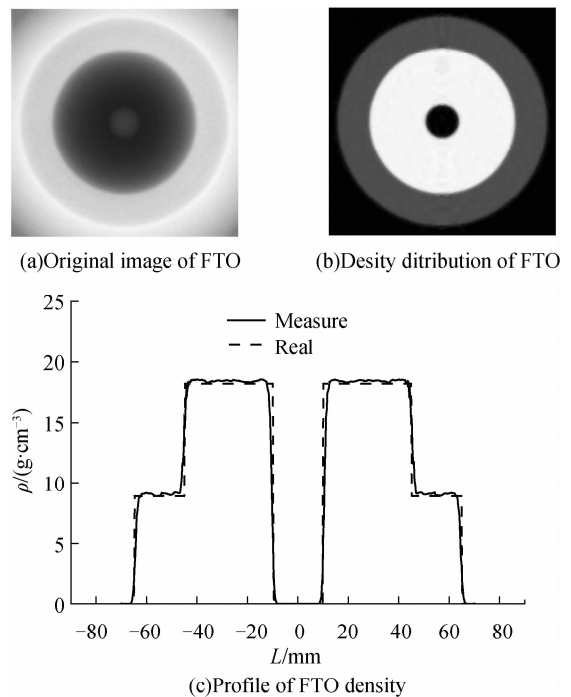


图 4 FTO 实验图像及其密度测量结果

Fig. 4 The image and density reconstruction result of FTO

表 1 3 种实验的结果

Table 1 Results of three experiments

No.	Relative error/(%)	RMS error/(%)
6573	5.8	10.8
6840	5.4	9.3
7389	6.0	11.2

高能闪光照相密度测量的误差来源主要有两个方面:一是高能闪光照相系统模糊成像。从图 4 的实验测量结果中可以看出,在客体的密度跃变位置(如

不同材料的边界处),受模糊成像因素的影响,密度测量结果变得比较光滑,与客体的实际密度有较大的差别.二是非线性校正过程.本方法将高能闪光照相的复杂成像过程等效为一个非线性算子,利用相似客体的实验图像测量出该非线性算子的响应曲线.该曲线与实际待测客体的响应曲线是否一致对客体光程分布的准确性有重要影响,进而影响密度测量结果的误差.

5 结论

利用高能闪光照相方法可以实现瞬态过程密度分布测量.本文介绍的方法将成像过程中诸多非线性成像因素,如底片的非线性响应、散射分布、能谱效应等,看成一个综合性的非线性过程.然后测量出该非线性响应过程的响应曲线,完成图像的非线性校正从而得到客体的穿透光程分布,最后使用 CT 等技术完成密度重建.对实际的静态客体照相图像的测量结果表明,该方法可以实现误差约 10% 的密度测量.

参考文献

- [1] MAURICE B A, HARRY E M, DALE M S, *et al.* Concluding report: quantitative tomography simulations and reconstruction algorithms[R]. UCRL-ID-146938, 2002.
- [2] KATIE W. Looking into the shadow world[J]. *Science & Technology Review*, 2001(July/August): 21-24.
- [3] BURNS M. Technology demonstration for the DARHT linear induction accelerators[C]. *Conference Preceeding on High Power Particle Beams*, 1992: 283-285.
- [4] MASCUREAU J. Design and progress of the AIRIX induction accelerator [C]. *IEEE Particle Accelerator Conference Preceeding*, 1993: 687-690.
- [5] CHRISTOPHER M, JOHN W H, PHLLIP G. Proton radiography[J]. *Los Alamos Science*, 2006: 30-32.
- [6] KENNETH M H. Introduction to bayesian image analysis[C]. *SPIE*, 1993: 1898: 716-731.
- [7] KENNETH M H, GEORGE W W. Bayesian approach to limited-angle reconstruction in computed tomography [J]. *JOSA*, 1983; **73**(11): 1501-1509.
- [8] HARRY E M, GEORGE P R, DAVID C C, *et al.* Active and passive computed tomography mixed waste focus area: final report[R]. UCRL-ID-131695-Rev1.
- [9] DENNIS M G, JOHANSSON E M, LAWRENCE T W. Optimization methods applied to constrained image restoration and speckle interferometry for extended objects[R]. UCRL-JC-110404.
- [10] DENNIS M G, JESSIE A J, MAURICE B A, *et al.* Image recovery techniques for X-ray computed tomography in limited data environments[R]. UCRL-ID-133380.
- [11] DING Bo-nan, Deng Jian-jun, Wang Hua-cen, *et al.* Dragon-I linear induction electron accelerator [J]. *High Energy Physics And Nuclear Physics*, 2005, **29**(6): 604-610.
丁伯南, 邓建军, 王华岑, 等. “神龙一号”直线感应电子加速器[J]. *高能物理与核物理*, 2005, **29**(6): 604-610.
- [12] GEORGE F B, MULLER K H. The use of the Monte-Carlo method to simulate high-energy radiography of dense objects [R]. LA-11727-MS, 1990.
- [13] LIU Jun, CUI Wei, SHI Jiang-jun, *et al.* Parameters affecting the characteristic of X-ray source[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 209-213.
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.
- [14] GUAN Yong-hong, WANG Run-sheng, SHI Jiang-jun. Nonlinear correction for radiography image[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 750-753.
管永红, 王润生, 施将君. 闪光照相底片成像非线性校正技术研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(5): 750-753.
- [15] GUAN Yong-hong, WANG Run-sheng, SHI Jiang-jun. Measurement of relative mass absorption coefficients for flash radiography[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(12): 1629-1632.
管永红, 王润生, 施将君. 闪光照相条件下相对质量吸收系数的测量[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(12): 1629-1632.

Density Reconstruction by Flash Radiography Using LEPM

GUAN Yong-hong, JING Yue-feng, XIAO Zhi-qiang

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract: Quantitative density reconstruction of an object in detonation process using high-energy flash radiography is described. In order to obtain the path length of the object, the radiographic image of the object is corrected by an integrated nonlinear function that represents the nonlinear imaging process of the high-energy flash radiographic system. The function is measured from the image that is obtained from a pre-knowing sample, and the sample is structural similitude with the object. The path length is reconstructed by algebraic reconstruction technique with the rule of least error. Then the density distribution of the object is obtained from the result of reconstruction when the mass absorption coefficient is deducted. A series of density reconstructions of a static radiographic test object is obtained by the radiographic system, and the results show that the errors of the density reconstruction are approximated to 10%.

Key words: Flash radiography; Density reconstruction; Image processing; LEPM method



GUAN Yong-hong was born in 1972. He received the Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2007, and his research interests focus on image process for radiography.