

X 光激发的发光玻璃成像系统的成像像面调节研究*

江孝国 王伟 王婉丽 祁双喜 钱伟新

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 在有限景深的光学系统中, 由于发光平面具有纵深方向的分布而不能清晰地成像于一个像面上; X 光激发的发光玻璃成像系统具有这种性质. 针对不同发光平面的发光强度呈现指数衰减规律的发光玻璃的成像问题, 用几何光学原理模拟了成像清晰度的变化规律, 为这类成像系统的调节提供了依据, 并获得了与理论推导的成像清晰度的变化规律相符的实验结果.

关键词 发光玻璃; 成像清晰度; 成像景深; CCD 相机; X 射线

中图分类号 TN383.3; O439 **文献标识码** A

0 引言

在 X 射线探测系统中, 由于 X 射线的穿透能力较强 (尤其是高能 X 射线), 想要提高对 X 射线的吸收能力从而提高对 X 射线的探测效率就必须增加 X 射线探测器 (如闪烁体材料、发光玻璃^[1]等) 的有效厚度. 在 X 射线二维成像系统中, 如果 X 射线探测器厚度增加, 则可能造成成像系统调节上的一些问题^[2]. 由于 X 射线在材料中的吸收呈现指数衰减规律, X 射线能量转换为可见光的发光分布相应地也呈现指数衰减规律; 那么, 对于一个有限景深的光学成像系统而言, 如何得到较大发光深度物体的较清晰的图像就变得比较重要了. 针对实际系统的参数情况, 选择了某种发光玻璃在不同入射能量 X 射线作用下的成像清晰度作为研究对象, 采用几何光学的成像原理研究了发光玻璃中的不同厚度处的成像情况, 建立了该系统成像像面调节的数学模型, 获得了具有理论指导意义的结论, 并得到了与理论结论相符的实验结果.

1 X 射线成像系统典型结构

X 射线成像系统典型结构如图 1 所示, 图中厚度为 H 的发光玻璃将入射的二维 X 射线图像转换为可见光图像, 并经过光学透镜成像于 CCD 相机的光敏面上, 由 CCD 相机输出一幅数字化图像供分

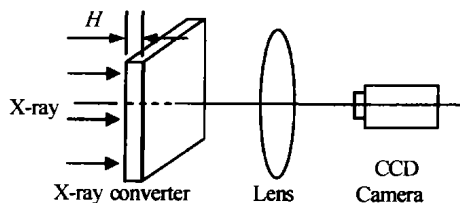


图 1 X 射线成像系统典型结构
Fig. 1 Typical structure of the imaging system

析; 光学系统的口径 D 为 280 mm, 焦距 f 为 450 mm, 目视分辨率不低于 300 lp/mm, 标准工作物距为 2.5 m. 按照文献^[3], 其景深约为 1.5 mm, 与实际观测到的现象一致.

2 系统成像问题分析

根据系统的实际情况, 主要以光轴及其附近区域作为研究对象, 并视为理想成像条件, 故将成像情况简化为不同物面在同一确定像面上的成像的合成, 并根据系统采用了 CCD 这种空间离散采样器件的特点, 运用几何光学的原理对图像清晰度的计算方法进行了分析.

首先, 确定标准工作物距 l_0 及对应的像面 l'_0 , 并将 CCD 光敏面置于 l'_0 , 这意味着系统清晰的成像物面为 l_0 . 其他物面如 l_1 、 l_2 等则将清晰地成像于像面 l'_1 、 l'_2 处, 图 2 以作图法显示了这个过程^[3,4]. 可以清晰地成像于其它像面上的像点在像面 l'_0 上的像则弥散为大小不同的斑, 图 2 中的 ds_1 、 ds_2 是清晰像在像面 l'_1 、 l'_2 处的情况下在 l'_0 上形成的斑, 明显地造成了图像模糊; 成像系统景深的概念虽然描述了这种图像模糊的情况, 但不够精确.

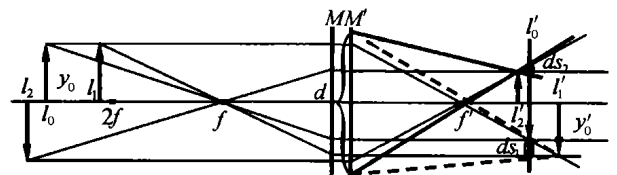


图 2 不同物面在确定像面上成像的模糊度示意
Fig. 2 Blur on the certain image plane caused by different object planes

图 3 显示了设定的成像平面 l'_0 上一个 CCD 像元 ds 接受不同发光物平面上的照射量的情况, 图中 d 为镜头的出瞳口径. 对于系统输出图像而言, 可以认为像高为 y'_0 的像元接收了来自不同物平面上的同一物高 y_0 处所有物点所产生的有效照射量的和. 对于物平面 l 上物高为 y_0 的物点而言, 图 3 中

* 国防科技基础研究基金资助课题
Tel: 0816-2484140 Email: j-xg-caep@sohu.com
收稿日期: 2003-11-17

的像 $i(x, y')$ 是其清晰的像点, 接收了物平面 l 上物高为 y_0 的物点所产生的照射量 $\phi(l, y_0)$, 但它在像平面 l'_0 上扩展为斑 ds' , 在其上的照度 E_r 变为 $\phi(l, y_0)/ds'$; 根据物平面 l 的不同, 斑 ds' 的大小、位置也不同, 并且位置有可能偏离像元 ds , 构成对其它像元的影响, 从而产生模糊; 因此 CCD 像元 ds 接收到的有效照射量为 E_r 在 ds 与 ds' 交叠部分面积 Δs 上的照射量, 大约应为 $\phi(l, y_0)/ds' \Delta s$.

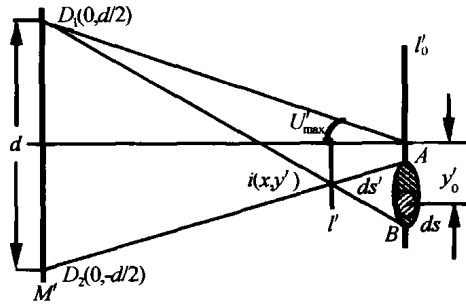


图3 确定像面上像元的有效照射量计算

Fig. 3 Effective illumination calculation for a pixel on the certain image plane

3 数学分析方法

3.1 物面发光强度 I

为便于计算, 选物面发光强度 I 作为发光特性物理量. X 射线穿透物体的衰减规律为^[5]

$$X = X_0 e^{-\mu_l \Delta l} \quad (1)$$

式中的 X_0 为入射处的 X 射线的照射量, X 为 X 射线穿透物体深度 Δl 处后的照射量, 单位为 C/Kg; μ_l 为物体的线吸收系数, 与射线的能量、物体材料相关, 单位为 cm^{-1} . 作为发光玻璃而言, 吸收 X 射线后的发光强弱与其吸收的 X 射线能量成正比^[6], 在深度 Δl 处的发光强度 I 可以表示为

$$I = I_0 e^{-\mu_l \Delta l} \quad (2)$$

I, I_0 的单位可用 $\text{ph} \cdot \text{sr}^{-1}$ 表示. 为了评价系统成像的清晰度和便于计算, 发光图案一般都采用正弦型变化的^[7], 如下所示

$$S(y) = [1 + \sin(2\pi f_s y)] \quad (3)$$

式中的 f_s 为空间频率, 单位 mm^{-1} ; y 为发光点离光轴的垂直距离, 单位 mm. 结合式(2)、(3), 发光玻璃体内 $(\Delta l, y)$ 的发光强度分布 $I(\Delta l, y)$ 可表示为

$$I(\Delta l, y) = I_0 e^{-\mu_l \Delta l} [1 + \sin(2\pi f_s y)] \quad (4)$$

3.2 像面光照度 E_r

光学系统对物面 l 发光能量的收集效率 η 为

$$\eta = I_1 d \Omega / I^2 = I_1 D^2 / (16 l^2) \quad (5)$$

根据文献[3, 4], 像面 l' 上光轴附近清晰像点接收的照射量 ϕ_i 为

$$\phi_i = \tau \eta = \tau I_1 D^2 / (4l)^2 \quad (6)$$

式中 τ 是光学系统的透过率, 约为 75%. 那么, 在像

平面 l'_0 上的照度为

$$E_r = \phi_i / ds' \quad (7)$$

3.3 有效接收面积 Δs

设定系统清晰成像的物平面调 l_0 , 可由成像的高斯公式求得像平面 l'_0 为

$$l'_0 = f l_0 / (l_0 - f) \quad (8)$$

在像平面 l'_0 上确定 CCD 像元 ds 的高度 y'_0 , 对应物高为 y_0 ; 那么, 就可以确定物面 l 上物高为 y_0 的物的像点 $i(x, y')$ 坐标, 再由直线的两点式即可求得像平面 l'_0 上 A、B 的坐标; 根据点 A、B 及 ds 的位置, 可以求得 CCD 像元 ds 与弥散斑 ds' 交叠部分的面积 Δs .

3.4 CCD 像元接收的照射量

明显地, CCD 像元接收到的由物面 l 上物高为 y_0 的物点所产生的有效照射量 ϕ_i 为

$$\phi_i = E_r \Delta s = \phi_i / ds' \Delta s = \tau I_1 D^2 / (4l^2) \Delta s / ds' \quad (9)$$

那么, 对于整个发光体而言, CCD 像元接收到的照射量为所有物面 l 上物高为 y_0 的物点所产生的有效照射量的总和, 对式(9)在发光体内求和或积分可以得到. 在模拟计算中, 仅仅考虑光学系统在理想成像条件下存在的景深模糊问题, 未考虑 CCD 的量子效率、暗电流及噪声等对系统输出图像对比度的影响^[8].

4 模拟结果分析

取 $f_s = 1/0.3 \text{ mm}^{-1}$, $d = 70 \text{ mm}$, $ds = 24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$, X 光子能量为 100 KeV 和 4 MeV, 发光玻璃的厚度为 5 mm、10 mm、20 mm 及 30 mm, 对不同成像物距时图像的清晰度进行了模拟, 如图 4(a) ~ (f) 所示, 图中的各数据是系统清晰物面离发光玻璃表面的距离, 从下到上按照逐渐清晰的顺序排列的. 对于均匀发光体, 要想获得清晰的发光图像, 应将系统物平面调节在发光体的中间, 图 4(a) 显示了这种情况, 并且说明对称于中间平面的物平面成像清晰度基本一致. 而对于发光具有指数衰减规律的情况, 成像物平面的调节应视发光体的厚度、入射 X 射线能量的不同而不同. 对于较薄的发光体, 如果入射 X 射线能量较高, 不易被吸收, 使得发光体前、后表面的发光强度相差不是很大(20% 以内), 则此时物平面也基本可以调节在发光体的中间, 如图 4(d) 所示; 与图 4(a) 不同, 对称于中间平面的物平面成像的清晰度已明显的不同, 物平面靠近入射 X 射线一侧的相对清晰. 如果入射 X 射线能量较低(例如 100 KeV), 则大部分的 X 射线在入射一侧表面附近被吸收了, 发光也集中在该区域, 此时则应该将物平面调节在

入射一侧表面附近获得尽量清晰的图像,图 4(b)、(c)明显地表示了这种情况;如果将物平面调节到发光体成像表面一侧,则图像清晰度大大降低,也如图 4(b)、(c)所示. 对于较厚的发光体,原则上应将物平面调节到靠近 X 光入射一侧来获得清晰的成像;图 4(d)、(e)、(f)基本说明了这种情况. 对于厚度为 30 mm 的发光体,当入射 X 射线能量为 4 MeV 时,物平面调节在离表面约 22 mm 处可以获得最清晰的成像. 对于入射 X 射线能量为 4 MeV 时,图 4(d)、(e)、(f)还说明了另一种情况:当物平面处于 0 mm 时,发光体厚度 10 mm、20 mm、30 mm 的成像清晰度依次降低,其原因有二:厚度越大,X 射线衰

减越多,在表面处的 X 射线较弱,故其表面发光强度越小,对清晰成像的贡献减小;厚度越大,远离清晰像面的物面成像越模糊,而这些物平面的发光强度又是较大时,其对模糊的贡献增大;因此,形成了这种情况. 图 4(b) 中的物平面 0 mm 相当于图 4(c) 中的物平面 5 mm,由于在这些平面处已无 X 射线,故不对成像的清晰度产生影响,所以对应的对比度是相同的;而在图 4(d) ~ (f) 中就没有这种情况发生,因为各对应平面处还有强弱不同的 X 射线,故对图像的清晰度有不同的贡献,导致对应平面的对比度并不相同.

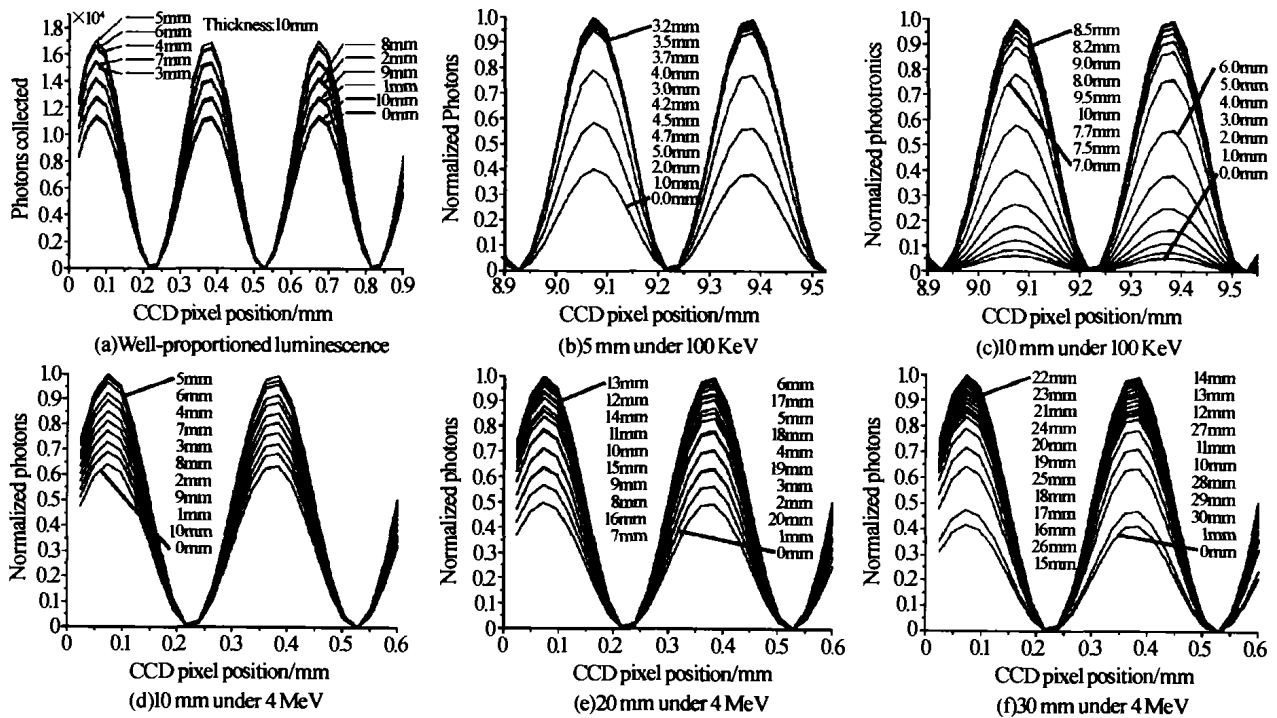


图 4 在不同入射 X 射线能量、不同的发光厚度下的图像清晰度
Fig. 4 Image definitions under different X-ray energy and glass width

5 实验结果

图 5 是用厚度为 5 mm 的发光玻璃在 100 KeV 的 X 射线作用下获得的成像情况. 为了更好地作比较,在显示时重新对图像的对比度进行了处理,以便能够直观地观察. 图像的清晰度明显地随所调节

的物平面位置而变化,而变化情况与图 4(b) 或图 4(c) 所表现的现象相一致,在图 5(a) 中能看到的一条细缝已不能在图 5(c) 中看到了,而图 5(e) 中的图像则已很模糊了.

6 结论

仅以几何光学原理分析了 X 射线成像系统中因为 X 射线探测器的厚度引起的成像清晰度,并建立了数学分析模型,获得了具有理论指导意义的结论,为这类浅景深成像系统的调节提供了依据,所获实验结果说明了推理的正确.

参考文献

1 张奇. 发光玻璃屏在 X 射线实时成像系统中的应用. 强激光与粒子束, 1999, 11(3): 299 ~ 301
Zhang Q. High Power Laser and Particle Beams, 1999, 11(3): 299 ~ 301

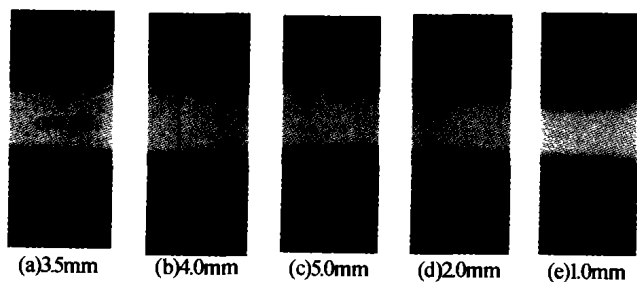


图 5 5 mm 厚的发光玻璃在 100 KeV 的 X 光作用下的成像情况

Fig. 5 Image definition changes with the depth of object plane under 100 KeV X-ray

- 2 唐淳,杨成龙,江孝国,等. 发光玻璃转换屏空间分辨率研究. 强激光与粒子束,2000,12(6):673~676
Tan C, Yang C L, Jiang X G, et al. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000,12(6):673~676
- 3 安连生,李林,李全臣. 应用光学. 北京:北京理工大学出版社,2002,3:100~102,116~117
An L S, Li L, Li Q C. *Applied optics*. Beijing: The Press of Beijing Institute of Technology, 2002, 3: 100~102, 116~117
- 4 胡玉禧,安连生. 应用光学. 合肥:中国科技大学出版社,2002,2:44~47,107~128
Hu Y X, An L S. *Applied optics*. Hefei: The Press of China University of Science and Technology, 2002, 2: 44~47, 107~128
- 5 吴世法. 近代成象技术与图象处理. 北京:国防工业出版社,1997. 3:32~43
Wu S F. *The recent image formation and process technology*. Beijing: Industrial Press of National Defence, 1997. 3: 32~43
- 6 江孝国,谭肇,王伟,等. CsI:Tl 转换屏的发光灵敏度研究. 光子学报,2002,31(22):321~326
Jiang X G, Tan Z, Wang W, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002,31(22):321~326
- 7 杨桦,焦文春,朱永红,等. CCD 相机在系统奈奎斯特频率处的调制传递函数. 光学学报,2002,22(3):313~316
Yang H, Jiao Wc, Zhu Yh, et al. *Acta Optica Sinica*, 2002,22(3):313~316
- 8 江孝国,谭肇,李泽仁,等. 影响 CCD 调制传递函数因素研究. 光子学报,2003,32(7):830~833
Jiang X G, Tan Z, Li Z R, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002,32(7):830~833

Adjustive Methods for Image-formation System Adopting X-ray Excitated Glass Scintillator

Jiang Xiaoguo, Wang Wei, Wang wanli, Qi Shuangxi, Qian Weixin
Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900

Received date:2003-11-17

Abstract In an optical image-formation system with very narrow depth of field, it is impossible to get a very clear image because of the longitudinal distribution of different illuminant plane. The image-formation system adopting X-ray excited glass scintillator features this character. In glass scintillator, luminous intensity of different planes decay exponentially with the depth X-ray penetrate through. In order to get a clear image from such a system, changing law of image definition is simulated in the way of geometrical optics and some very meaningful results are derived. The reasons how to adjust such a system according to the X-ray energy and the width of the glass are also explained. The experimental results according with the simulated image definition are displayed.

Keywords Glass scintillator; Image definition; Depth of field; CCD camera; X-ray



Jiang Xiaoguo graduated from photoelectron technology specialty of Department of Applied Physics of Science and Technology University of National Defence in 1990. He is studying on the application of photoelectron technology in the Institute of Fluid Physics and is working on the application of CCD, the digital image processing and the study on low noise signal circuits. He has published over ten articles in the domestic core magazines.