



核科学与工程

闪光照相散射定量技术初步研究*

贾清刚¹, 毛朋成², 王文远¹, 孔令海¹, 杨波¹, 许海波¹

(1. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088; 2. 中国工程物理研究院 研究生院, 北京 100094)

摘要: 高能 MeV 闪光照相所针对的客体通常具有极高的面密度。当 X 射线穿过客体时, 直穿 X 射线的强度将被极大衰减, 到达成像面的直穿信号可能被散射“噪声”所淹没, 若直接对图像进行反演将严重影响照相重建精度。从散射抑制角度出发, 目前主要采用网栅相机即阵列型准直孔阻挡散射, 但网栅相机的应用效果受光源位置稳定性影响较大, 且网栅不易加工。提出了一种可实时定量散射强度的照相方案, 该方案利用狭缝准直器对散射的抑制能力不随散射强度变化而改变这一特点, 对现有照相布局进行小改进, 利用已知客体实验结果标定狭缝准直器对散射的抑制能力, 进一步自洽确定待测客体的散射量大小。基于蒙特卡洛方法的仿真照相实验结果表明, 当采用低面密度客体标定散射抑制系数时, 高面密度客体散射强度的估计值与模拟真实值偏差可小于 2%。

关键词: 高能 X 射线; 闪光照相; 成像方案; 图像反演; 散射补偿

中图分类号: O438.1

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210488

Preliminary study on scatter quantification method for flash Multi-MeV radiography

Jia Qinggang¹, Mao Pengcheng², Wang Wenyuan¹, Kong Linghai¹, Yang Bo¹, Xu Haibo¹

(1. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China;

2. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100094, China)

Abstract: For multi-MeV X-ray flash radiography, the areal density of object can be obtained by the primary direct X-ray. Objects of flash radiography often have very high areal densities which greatly attenuate the intensity of direct X-rays emitted by the source. At this time, the direct penetration signal that can transmit the region of interest inside the object will be smaller than that of the scattered X-ray “noise”. If the captured image is reconstructed directly without scatter correction, it will affect the accuracy of reconstruction. The main method to reduce the scatter X-ray from a physical point of view is to use an anti-scatter grid, that is, an array-type collimation hole. However, the performance may be affected by the stability of the X-ray source spot, and the manufacture of such anti-scatter grid is very difficult. This paper proposes a new imaging method that does not rely on anti-scatter grid. This method only makes small improvements on the existing imaging layout, and can easily and self-consistently determine the amount of scattering for scattering correction. A Monte Carlo simulation is given to show the performance of scatter estimation, and the relative difference between the estimated intensity of scatter and the real value (provided by the simulation) for an object is less than 2% when a known object with less areal density is applied for calibration.

Key words: high-energy X-ray, flash photography, imaging plan, image inversion, scattering compensation

利用辐射与物质的相互作用规律, 闪光照相技术通过测量经客体衰减后的辐射强度分布反推出客体内部密度信息。目前广泛采用高能 X 射线作为辐射探针对客体进行诊断。除直穿衰减外, 高能 X 射线穿过客体也可能发生散射并最终叠加到直穿信号上, 导致客体密度重建时出现偏差^[1]。散射信号并非完全无规律的噪声, 其与客体密度分布存在极弱的相关性, 并在一定程度上受照相距离及放大倍数影响^[2]。散射分布与密度分布并不存在一一对应关系。对于法国实验客体 (FTO), 成像面中心附近面密度可达 200 g/cm², 直穿信号强度 (仅考虑通量, 略去能

* 收稿日期: 2021-11-12; 修订日期: 2022-06-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11805018)

联系方式: 贾清刚, jia_qinggang@iapcm.ac.cn。

谱及探测器响应)不足散射强度的 10%。结合蒙特卡罗等数值模拟方法可在图像反演过程中将散射影响扣除^[3-4]。

如何在实验中实时确定散射量是影响密度诊断正确性的关键。通常采用蒙特卡罗模拟及静态客体研究散射量,但无论蒙特卡罗模拟或静态实验均依赖于先验密度场的输入,得到的散射绝对量受照射量、能谱等因素影响,难以直接应用于实验处理中。若采用直散比这一相对量概念标定散射量,则散射扣除多少直接依赖于先验静态客体的密度设计,即按静态客体标定的直散比反演出的面密度将与静态客体面密度接近,因此直散比方法无法自洽标定散射。换句话说,设计出较高面密度的静态客体,则反演实验结果也将获得较高的面密度。

现有散射量的扣除并无标准,而质量先验对于大范围区域的密度能有效约束^[5],散射量扣除对该部分密度反演结果影响不大。然而,对于靠近中心的局部区域,由于其体积占比小,密度变化不会对总质量有显著影响,即使采用质量约束仍可能无法有效地确定散射量。

本文从实验角度出发,研究设计具有较高精度及鲁棒性的散射量标定技术方案。通过物理设计增加狭缝准直及线闪烁体用于获得含散射信息的额外可测量,结合原有阵列转换屏的测量结果,共两组(含散射直穿的)测量值,在理论上可联立求解出散射与直穿份额。进一步利用狭缝准直对散射的抑制能力与散射强度无关这一特点,可使用已知静态样品标记狭缝对散射抑制能力的特征参数,最终用于未知样品散射求解。

1 散射量标定实验设计方案

通过实验设计确定客体散射量的基本思路为:设计测量与散射相关的相对量,且中心面密度对该待测量不敏感。测量时,在阵列式转换屏后额外设置狭缝准直以减小散射。散射的减小系数与狭缝准直对散射的衰减能力相关。目前高能闪光照相系统^[5]多采用前安全窗、倒准直、旋转对称客体、后安全窗及阵列转换屏的五部件照相布局,散射量标定实验设计基本结构如图 1 所示。

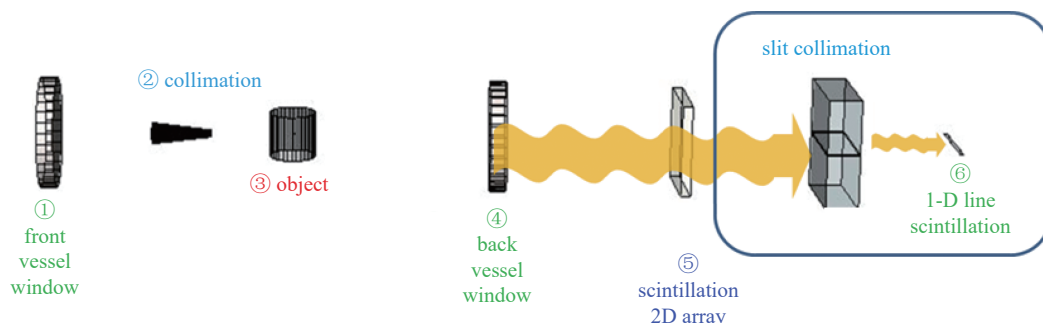


Fig. 1 Basic layout and improvement plan (framed) of flash radiography

图 1 闪光照相基本布局及改进方案

散射量标定实验在原有照相布局基础上进行部分改进,见图 1 右侧框内区域。在阵列转换屏后 1 m 处(可根据实际光路调整)设置狭缝准直。客体、后安全窗及阵列转换屏上产生散射经狭缝准直后大幅度衰减。图 1 中黄色波浪线在狭缝前后的强度变化所示代表散射的衰减程度,其与准直过程相关,与客体的密度分布无关。

2 散射量标定实验设计理论论证

原有照相布局在⑤阵列转换屏处只获得式(1),无法定标散射量 S_5 与直穿量 P_5 , 增加狭缝准直及线闪烁体后可多获得式(2)

$$S_5 + P_5 = M_{5(I_5, J_5)} \quad (1)$$

$$S_6 + P_6 = M_{6(I_6, 0)} \quad (2)$$

式中: P, S 分别代表直穿量、散射量, M 为测量结果, 下标对应图 1 中所示位置, 如下标 5 代表阵列转换屏, 6 代表线阵闪烁体, 式(2)为一维线准直测量结果。 $M_{5(I_5, J_5)}$ 代表由二维成像阵列所获得图像中点 (I_5, J_5) 处的强度, $M_{6(I_6, 0)}$ 代表由狭缝准直器后一维线闪烁体所获数据中点 $(I_6, 0)$ 的强度(该一维线闪烁体沿 X 轴分布)。联立方程(1)、(2)时, $M_{5(I_5, J_5)}$ 中 J_5 等于 0。

实验只能测得 $M_{5(I_5, J_5)}$ 与 $M_{6(I_6, 0)}$, 此时该方程组依然无法求解。若建立经狭缝准直后直穿量 P_5 与 P_6 、散射量 S_5 与 S_6 的正比系数关系 C 及 R , 则方程可解, 即可根据测量结果同时计算散射量及直穿量。直穿量变化系数 C 的取值受阵列屏衰减、光源空间效率(点源近似)等因素影响, 值小于 1, 可用式(3)近似表达

$$P_{6(L_s,0)} = e^{-\mu LD} \times \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^2 \times P_{5(L_s,0)} \quad (3)$$

式中： μ 为阵列屏衰减系数， L 为特征线穿透阵列屏长度（近似为阵列屏厚度）， D 为阵列屏密度， L_1 、 L_2 分别为阵列屏及线阵闪烁体到 X 射线光源的距离。系数 C 的计算公式可供物理分析采用，在实际中使用实验方法予以标定，具体方案见 2.1 节。

模拟表明，受狭缝准直引入的额外散射影响， R 可能存在分布，即 R 取值随位置发生变化。通过增加狭缝准直与线探测器距离（如 40 cm 以上），可显著减小狭缝准直引入的影响，近似认为在照相关键区域 R 基本为常数。

2.1 参数标定方法

考虑到标准 FTO 客体中心模拟散射量与直穿量相近，本文中模拟样品采用与 FTO 客体类似结构的球壳嵌套模型，其密度分布如图 2 所示。对于最高密度为 45 g/cm^3 的客体命名为 FTO-U45，其余类似。

对于 FTO-U35（密度分布如图 2 所示），采用蒙特卡罗模拟^[6] 获得散射及直穿信号如图 3 所示。采用倒准直布置的照相系统，中心区域（靠近图 2 中半径值为 0）直散比与其他区域差别较大，处理获得的中心区域附近面密度对散射扣除量十分敏感。

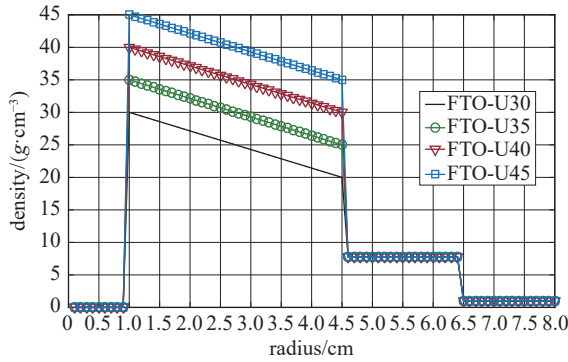


Fig. 2 One-dimensional density distributions of FTO-like objects

图 2 假设变密度 FTO-Den 一维密度分布

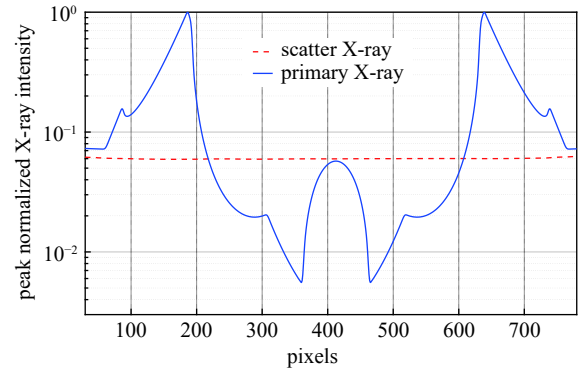


Fig. 3 Primary and scatter X-ray distribution of FTO-U35 with inverted collimation

图 3 蒙特卡罗模拟含倒准直变密度 FTO-U35 照相直穿散射分布

当客体叠加倒准直体后，整个面密度分布存在极小值，即对应图像中 X 射线强度最大的位置。在此处直穿量占主导，即散射远小于直穿，因此直穿变化系数 C 可采用准直前后所获图像中 X 射线强度的极大值之比来计算。结合图 4 中所示的模拟测量数据，在横坐标为 190 及 630 像素附近，准直前后的图像中 X 射线均达到极值点，强度之比可计算直穿变化系数 C ，如式(4)所示

$$C = \frac{M_{6(190,0)}}{M_{5(190,0)}} \quad (4)$$

进一步结合蒙特卡罗程序模拟照相予以说明，其中准直器采用厚度分别为 10 cm、30 cm 的狭缝，狭缝宽度为 5 mm。采用 JMCT 模拟阵列屏及狭缝后线阵列探测器的预期测量结果（包含散射加直穿）如图 4 所示。在狭缝准直宽度不变情况下，当狭缝准直厚度达到 10 cm 时，增加厚度对散射的抑制能力基本已达到饱和，应综合考虑定位精度、光源位置晃动等因素设计狭缝准直参数。

使用狭缝准直后与仅使用阵列屏相比，总强度（直穿+散射）降低，通过对比离轴距离 ± 190 像素处的峰值强度，可获得 $C = 0.263$ 。式(1)、(2)可分别改进为式(5)、(6)，即

$$S_5 + P_5 = M_{5(L_s, J_s)} \quad (5)$$

$$P_5 + \frac{R}{C} \times S_5 = \frac{1}{C} \times M_{6(L_s, 0)} \quad (6)$$

与公式(6)形式相同，将图 3 中经狭缝准直后曲线强度提升 $1/C$ 倍后，获得与阵列屏分布对比如图 5 所示。

根据式(5)、(6)及图 3 分析可知，在直散比较大区域，即图 5 中像素位置介于(100~200)、(630~730)对应的直穿主导区，准直前后照相直接获得的强度线性关系可直接反映准直前后直穿份额的关系 C 。调整狭缝准直后，该区域直穿份额与准直前一致，可以直接根据照相数据来标定系数 C 。对于所关心的中心区域（散射主导区域），

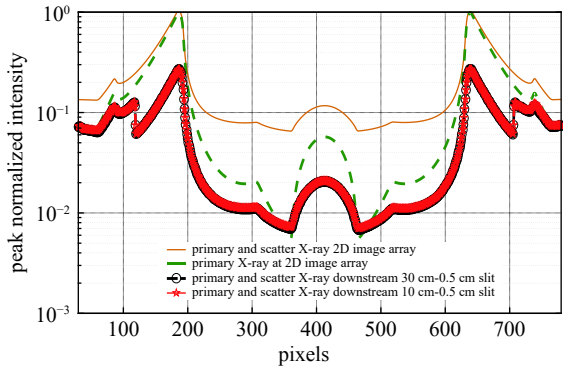


Fig. 4 Expected intensity distribution of FTO-U35 at the 2D array and downstream slit

图 4 阵列屏及狭缝准直后 FTO-U35 照相预期强度分布

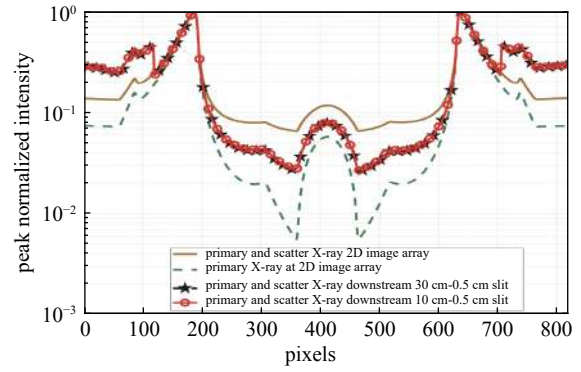


Fig. 5 Expected intensity distribution of the array screen and the adjusted slit quasi-FFTO-U35 photography

图 5 阵列屏及调整后狭缝准 FTO-U35 照相预期强度分布

利用 R 进行标定后即可经式(7)计算得到散射份额 S_5

$$S_5 = \frac{M_{5(I_s, J_s)} - \frac{1}{C} \times M_{6(I_s, 0)}}{1 - \frac{R}{C}} \quad (7)$$

式中: 系数 R 可采用已知密度分布的锥塔进行标定。首先用直穿主导区对比方法获得 C , 经照相扣散射后密度分布与理论密度分布对比标定获得 S_5 。以图 4 所示结果为例, 可用静态标定散射 S_5 , 这里直接采用计算结果 $S_5 = 0.06$ 。

如图 5 所示, 在面密度最高处, 狭缝后响应强度调整后值为 0.027, 较相同位置阵列转换屏(0.065)低, 即 $M_{5(I_s, J_s)} - \frac{1}{C} \times M_{6(I_s, 0)} = 0.038$ 。根据式(7)及散射可反向计算获得 $R = 0.096$ 。采用蒙特卡罗算法直接模拟准直前后散射变化量 $R' = 0.09$, 与经上述方法标定参数 R 有一定偏差(约 7%), 主要由于该客体照相面密度最深处散直比较大(接近 20)所致。

2.2 根据标定参数获得不同客体散射

根据已知 FTO-U35 定出的 10 cm 厚度、0.5 cm 宽的狭缝结构的散射衰减系数 $R = 0.096$, 进一步考察该参数对于 FTO-U30 及 FTO-U40 模拟照相中散射的计算准确性。除客体外, 其余照相布局均不改变。获得 FTO-U30 狭缝准直前后直穿及散射强度分布如图 6 所示。采用 2.1 节中所述算法, 根据准直前后光响应差以及标定好的 C 、 R 取 0.096 时计算得到散射估计值为 0.057, 实际模拟散射量为 0.064, 散射估计量偏小 11%。

类似地计算获得 FTO-U40 狭缝准直前后直穿及散射强度分布如图 7 所示。计算得到散射估计值为 0.0533, 实际模拟散射量为 0.0547, 散射估计量偏小 2.6%。

FTO-U45 狭缝准直前后直穿及散射强度分布如图 8 所示。计算得到散射估计值为 0.0540, 实际模拟散射量为 0.0545, 散射估计量偏小 1%。

通过 FTO-U35 标定的系数计算其他客体, 对于较低密度客体 FTO-U30, 估计散射量高于模拟散射量, 且偏差较大为 11%, 而对较高密度客体 FTO-U40 及 FTO-U45, 估计散射量低于模拟散射量, 偏差小于 3%。下面分别采用 FTO-U30 及 FTO-U45 标定参数 R 与 C , 重新计算其他客体散射量并与模拟结果对比分析。

2.3 客体对参数标定的影响

按上述方法, 统计 FTO-U30、FTO-U45 高密度与低密度客体标定获得参数用于其他密度客体的散射评估, 其中 FTO-U30 分析计算得到结果如表 1 所示。由于阵列屏、放大倍数、狭缝准直等未发生改变, 参数 C 仍为 0.2632 (实际标定值即 0.2632)。其中 FTO-U40 与 FTO-U45 的前后变化量取两位有效数字, 散射估计时采用 4 位有效数

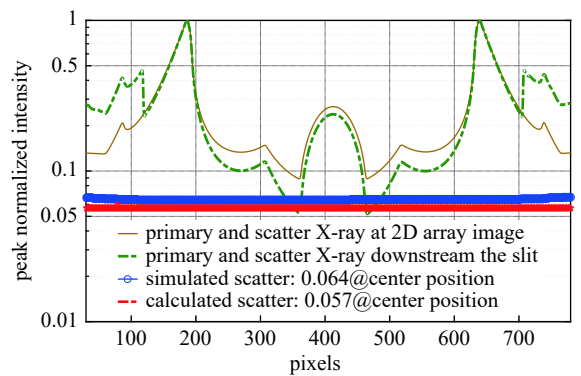


Fig. 6 FTO-U30 camera slit straight through and scattering intensity distribution before and after collimation

图 6 FTO-U30 照相狭缝准直前后直穿及散射强度分布

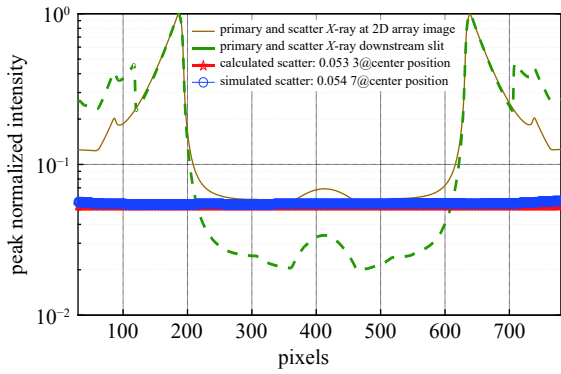


Fig. 7 FTO-U40 camera slit straight through and scattering intensity distribution before and after collimation

图 7 FTO-U40 照相狭缝准直前后直穿及散射强度分布

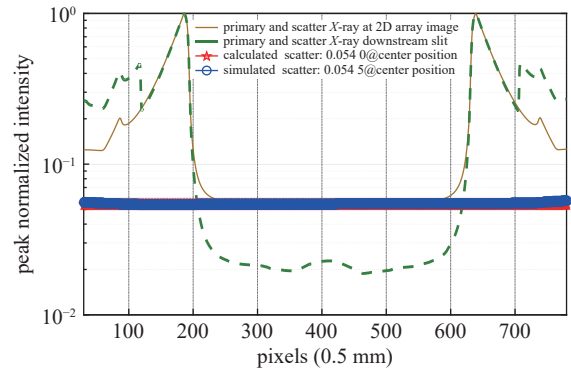


Fig. 8 FTO-U45 photographic slit straight-through and scattering intensity distribution before and after collimation

图 8 FTO-U45 照相狭缝准直前后直穿及散射强度分布

表 1 采用 FTO-U30 客体标定 R 用于估计其余客体散射值

Table 1 Calibration of R by FTO-U30 object to estimate the scattering value of other objects

object name	variation before and after slit collimation (measurement)	simulated scatter value	calculated scatter value	scatter after collimation (simulation)	R	relative deviation/%
FTO-U30(for calibration)	0.0294	0.064	—	0.0059	0.0975	—
FTO-U40	0.035	0.055	0.056	—	0.0975	+1.8
FTO-U45	0.035	0.055	0.056	—	0.0975	+1.8

字,故相对偏差有所不同。

FTO-U45 客体标定 R 并计算其他客体结果如表 2 所示。

表 2 采用 FTO-U45 客体标定 R 用于估计其余客体散射值

Table 2 Calibration of R by FTO-U45 object to estimate the scattering value of other objects

object name	variation before and after slit collimation (measurement)	simulated scatter value	calculated scatter value	scatter after collimation (simulation)	R	relative deviation/%
FTO-U45(for calibration)	0.0354	0.055	—	0.0052	0.0945	—
FTO-U30	0.0294	0.062	0.046	—	0.0945	-25.6
FTO-U35	0.034	0.060	0.053	—	0.0945	-11.7

根据表 1 及表 2 结果分析可知,采用低密度已知客体标定出的参数,计算得到高密度客体的散射结果与模拟散射偏差较小,而采用高密度客体标定结果偏差较大。可能由于高密度客体后测量信号绝对量低、模拟涨落较大所致。实际实验中可选取低密度客体标定参数 R 及 C 。若采用 FTO-U30 标定参数计算 FTO-U45 的散射存在约 2% 的偏差,考虑该装置的散直比接近 20,散射扣除偏差将传导至直穿量并最终影响面密度及体密度,对面密度影响约为 12 g/cm^2 ,对反演体密度影响约为 1.7 g/cm^3 (偏差约 4%)。

上述偏差一部分来源于常数散射近似,即假设散射在成像面上为常数,或者至少在直穿极大与散射极大两个对比点处散射基本为常数。若散射分布非均匀,还应结合蒙特卡罗方法迭代计算。

2.4 狭缝准直器设计

散射值通过根据式(5)、(6)联立求解, R/C 值越则小散射求解精度越高。根据前面分析,当狭缝厚度达到 10 cm 及以上时,保持狭缝宽度不变,则该狭缝对于散射的抑制能力基本不变。考虑到 X 射线光源在多次实验中可能存在一定偏移晃动^[7],其晃动量围绕中心值偏离较小,如小于 1 mm 时,则采用 2 mm 宽度狭缝对准光源也可以使 C 保持不变, R 值较 5 mm 宽度狭缝将有一定程度的减小。

从另一角度讲,只要保证 C 取值只与实验布局相关而与实验脉冲无关,则无论使用何种准直方式都不会影响实验流程对散射的定量过程。为了提升准直能力减小 R 值,还可使用类似扇束 CT 照相的线准直,或者网栅孔较粗,如 5 mm 以上尺度的对心阵列网栅^[8],该类型准直器横断面基本结构如图 9 所示,其中黑色区域为准直空腔,白色区域为准直材料,所有准直空腔对准 X 射线光源。具体线束准直网栅准直腔尺寸还应结合光源晃动情况、加工

等实验需求具体设计。

3 结 论

本文提出一种新型散射标定实验设计,通过在阵列转换屏后设置狭缝准直器,实现衰减散射而不影响直穿量。当狭缝准直器固定时,准直器前后直穿量与散射量的变化规律稳定不变,利用该变化规律可求解未知客体的散射与直穿份额。基于蒙特卡罗方法对所设计的实验过程进行模拟分析,对于改进密度的FTO客体,结合已知密度客体所标定的散射量衰减规律及相关模型参数,采用狭缝或网栅准直前后图像的局部比例关系,可以实时计算未知密度FTO客体的散射强度。采用低面密度客体FTO-U30标定参数可用于计算高面密度客体FTO-U45的散射量,散射计算结果与实际模拟值偏差小于2%。

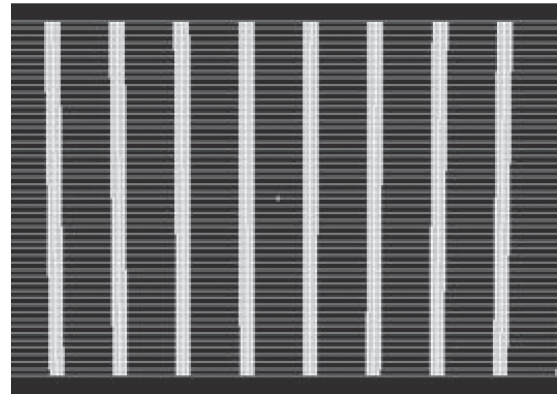


Fig. 9 Schematic diagram of the visualized cross-section of the array collimator

图 9 阵列准直器可视化横断面示意图

参考文献:

- [1] 施将君, 刘军, 刘进, 等. 闪光照相中源尺寸和散射对成像的影响[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(10): 1727-1730. (Shi Jiangjun, Liu Jun, Liu Jin, et al. Effects of source spot size and scatter on imaging in radiography[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(10): 1727-1730)
- [2] 刘军, 张绚, 刘进, 等. 闪光照相中散射分布均匀性的影响因素[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(3): 447-450. (Liu Jun, Zhang Xuan, Liu Jin, et al. Factors affecting scatter uniformity in flash X-ray radiography[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(3): 447-450)
- [3] Liu Jin, Liu Jun, Jing Yuefeng, et al. Decreasing the scatter effect in density reconstruction in high-energy X-ray radiography[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2013, 716: 86-89.
- [4] Cao Liangzhi, Wang Mengqi, Wu Hongchun, et al. Scattering correction for image reconstruction in flash radiography[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2013, 45(4): 529-538.
- [5] 刘军, 张绚, 刘进, 等. 高能闪光照相中网栅相机的性能分析[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 024003. (Liu Jun, Zhang Xuan, Liu Jin, et al. Performance analysis of anti-scatter grid camera in high energy flash radiography[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 024003)
- [6] Deng Li, Li Gang, Zhang Baoyin, et al. JMCT Monte Carlo code with capability of integrating nuclear system feedback[C]//Proceedings of the 2018 2nd International Conference on Applied Mathematics, Modelling and Statistics Application (AMMSA 2018). 2018: 48-54.
- [7] Ekdahl C, Abeyta E O, Bartsch R, et al. DARHT-II long-pulse beam-dynamics experiments[C]//Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference. Knoxville. 2005: 19-23.
- [8] Watson S A, Appleby M, Klinger J, et al. Design, fabrication and testing of a large anti-scatter grid for megavolt γ -ray imaging[C]//IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. 2005: 717-721.