



# 射线半影成像与大面积源区中子成像 实验系统理论模拟评估

吴岳雷<sup>①\*</sup>, 胡华四<sup>①\*\*</sup>, 张博平<sup>①</sup>, 李林波<sup>②</sup>, 陈达<sup>①③</sup>, 单卿<sup>③</sup>, 祝杰<sup>④</sup>

① 西安交通大学能源与动力工程学院核能系, 西安 710049;

② 中国工程物理研究院二所, 绵阳 621000;

③ 南京航空航天大学材料学院, 南京 210016;

④ 第二炮兵工程学院, 西安 710025

\* E-mail: wuyuelel@stu.xjtu.edu.cn;

\*\* E-mail: huasi\_hu@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2008-09-25; 接受日期: 2009-02-11

国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合项目(批准号: 10576022)资助

**摘要** 阐述射线半影成像条件与重建基本原理, 推导其数学解析表达式; 建立系统蒙多卡罗数字模型; 获得源区中两离散单元点的系统响应函数(点扩散函数), 验证考核了系统空不变特性; 利用数学解析卷积和模拟实验两种方法, 分别获得源区中 4 个单元点的“半影图像”, 用同一滤波重建方法分别对两种不同途径获得的 4 点半影图像进行恢复重建, 得到相同的结果, 揭示了射线半影图像的编码实质; 通过 MCNP 模拟计算, 获得了整个源区面在闪烁光纤阵列相面上的中子半影图像, 应用改进型维纳滤波方法重建反演获得了源区中子通量分布图像, 与预置的中子源区图像进行了分析比较, 从原理上验证了系统中子半影成像实验的可行性, 以及改进重建算法的可靠性。

**关键词**

半影成像  
图像重建  
单元点源  
直线传播  
空间不变

在惯性约束聚变(ICF)实验中, 通过探测氘氚靶丸发生热核聚变放出射线和粒子, 获得聚变热核内部诊断信息的研究, 美国、日本、欧洲相关科研单位自 20 世纪七八十年代, 尝试了各种探测手段和方法<sup>[1-6]</sup>, 近四十年来, 积累了大量的经验和成果<sup>[7-10]</sup>. 与探测靶丸等离子体发射的X射线相比较, 探测热核高能中子空间辐射通量分布更能直接反映靶丸热核内爆压缩区的空间尺度、形状、均匀性以及DT燃料等离子体温度半径分布等信息且不受靶丸面密度大小的影响. 由于 14 MeV 的聚变中子介于快中子和特快

中子之间, 现有的辐射探测器材料对其俘获截面很小, 对其探测效率非常低. 人们在努力提高聚变效率增大中子产额的同时, 增大了探测器前面准直器孔径, 以至于其孔径的尺度大于目标聚变源区尺度, 随之小孔成像也就变成了半影成像, 所谓半影针孔成像是小孔成像的继承和发展, 半影针孔的主要特点是内孔径尺度大于目标聚变源区尺度, 提高了成像射线与粒子的孔径穿透率, 相对降低了探测器对源区中子产额的探测低限, 半影成像几何原理如图 1 所示. 半影成像是复杂的编码影像, 需要大量的数据

**引用格式:** 吴岳雷, 胡华四, 张博平, 等. 射线半影成像与大面积源区中子成像实验系统理论模拟评估. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(10): 1670-1677  
Wu Y L, Hu H S, Zhang B P, et al. On the effectiveness of dry drainage in soil salinity control. actuator. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(9): 2567-2575,  
doi: 10.1007/s11431-009-0188-z

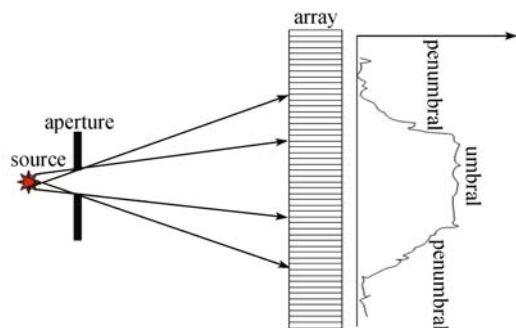


图 1 中子半影成像几何原理

解码运算, 近些年随着计算机技术的高速发展, 计算机成本降低而计算速度越来越高, 因此计算机快捷出色的数据处理能力使得核反应实时辐射成像成为可能, 由此中子半影成像也成为对微型激光诱变惯性约束 DT 聚变核反应诊断的必要研究手段之一。1988 年, Ress 等人在《Science》上发表了在美国里弗莫尔实验室(LLNL)激光聚变装置 Nova 上中子半影针孔成像的文章<sup>[1]</sup>, 证明 14 MeV 中子成像的实验可行性。Dsidier 在美国 OMEGA 激光装置上开展了中子半影针孔成像的实验研究<sup>[5-9]</sup>。中国工程物理研究院激光聚变研究中心的赵宗清、温树槐、刘东剑等人以及中国工程物理研究院核物理与化学研究所的陈法新等人依托中国现有的神光 II 号聚变装置, 对中子半影成像进行了大量的研究工作<sup>[11,12]</sup>。目前由于国内现有射线聚变驱动器的限制, 中子产额相对较低, 开展中子半影成像诊断技术研究比较适合当前国情。

本文阐述了射线半影成像与重建原理, 推导了成像与重建的近似数学解析式表达式; 根据西安交通大学核科学与技术学院实际设计的 ICF 中子成像诊断装置的空间位置分布和各装置的实物材料组成, 选定能够真实地反映中子在系统中输运特性的关键部分, 建立系统数字模型; 分别计算源区中心单元点和偏离源区中心 100  $\mu\text{m}$  处单元点的系统响应函数(点扩散函数), 验证了该系统的空不变(线性)特性; 利用源区面中子通量二维空间分布函数与半影孔径空间传递函数的纯数学解析卷积法, 得到源区中 4 个独立单元点的纯数学解析“半影图像”; 利用蒙多卡罗二维空间源区随机粒子抽样数字实验法, 获得源区中 4 个独立单元点在闪烁光纤阵列上的“半影图像”; 利用同一重建算法对两组“半影图像”分别进行了恢复重建, 得

到相同结果, 揭示了射线半影图像的编码实质, 总结说明了系统空不变是半影图像重建的必要条件。

本文利用 MCNP 编写模拟程序在高速并行计算机工作站进行数字实验, 得到了整个放射活性源区面在闪烁光纤阵列相面上的中子半影图像, 最后利用本课题组研发的改进型维纳滤波处理方法对其重建反演, 模拟分析了中子系统传播中所具有的特殊性, 验证射线半影成像在中子成像中的通用性, 从理论原理上初步证明了中子半影成像系统实验与重建算法的可行性。

## 1 中子半影成像系统与成像重建原理

### 1.1 中子半影成像系统

中子半影成像系统主要包括: 等待诊断探测的未知中子源(target pill)、半影针孔(aperture)、闪烁光纤阵列(scintillation fiber array)、图像光电数字转化装置(CCD)、用于数字重建计算的并行计算机工作站(work station)以及相关数据处理和显像软件(mat lab)。源、半影孔径、闪烁光纤阵列为主要成像元件, 其中半影编码针孔是关键的部分, 也一直是技术瓶颈, 国内外有关科研人员做了不少工作<sup>[12,13]</sup>。中子半影成像系统示意图如图 2 所示, 本课题组已经设计制造半影针孔与闪烁光纤阵列等关键部件等实物样品, 并做过相应的专项检测实验, 所测各项指标均符合设计指标<sup>[14]</sup>。半影针孔孔径大于源区尺度, 由西安交大胡华四发明的特制辐射屏蔽材料<sup>[15]</sup>制作, 闪烁光纤阵列采用美国贝肯公司的 BCF-10 闪烁光纤产品,  $L_0$  为物距,  $L_1$  为相距, 系统几何放大率  $M=L_1/L_0 \approx 100$ ; 反射镜(reflection)是改变光路, 规避剩余射线, 保护后续光路元件; 像增强器(IIT); 光电数字转换装置(CCD)是科学级制冷 CCD, 噪声小, 其接收光谱与 BCF-10 发射光谱匹配较好。并行工作站接收处理与重建 CCD 传输过来的数字图像。

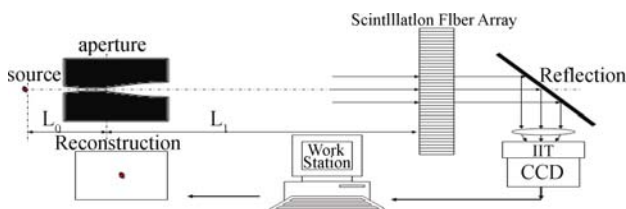


图 2 中子半影成像系统示意图

## 1.2 中子半影成像与重建原理

**1.2.1 半影成像原理.** 在核辐射探测学中, 用一个仪器来观测和记录一个物理现象和过程时, 所得到的观测和记录不仅反映物理现象和过程, 还反映该仪器系统的响应特性. 仪器系统的响应机制在数学上可以用表述为

$$p(\mathbf{r}) = S \left\{ \int f(\mathbf{r}_0) \cdot h(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0) d\mathbf{r}_0 \right\}, \quad (1)$$

式中  $f(\mathbf{r})$  是原有物理量,  $f(\mathbf{r}_0)$  为初始空间  $\mathbf{r}_0$  处的函数;  $p(\mathbf{r})$  为空间  $\mathbf{r}$  上获得的观测;  $h(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0)$  为仪器对初始空间  $\mathbf{r}_0$  上对  $f(\mathbf{r}_0)$  的观测;  $S\{\}$  为系统元件和记录介质的响应过程, 仪器测量系统一般是线性系统, 现将该函数设为常数 1.

(1) 式为射线半影成像原理全真表述, 源区每个点都具有各自的空间传递函数, 本文 3.5 节中 MCNP 数字实验抽样过程是 (1) 式的全真演绎, 这里观测函数  $p(\mathbf{r})$  为像函数, 则  $p(\mathbf{r})$  为两独立随机变量和的概率密度函数, 它等于源中子通量概率密度函数  $f(\mathbf{r})$  与系统空间响应函数概率密度函数  $h(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0)$  的概率密度函数的卷积.

射线半影成像是线性系统, 如果系统在初始空间输入信号为  $f(\mathbf{r}_0)$ , 那么系统就得到输出信号为  $f(\mathbf{r}_0) \cdot h(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0)$ , 该中子半影成像系统为空间不变(线性)系统, 则  $h(\mathbf{r} | \mathbf{r}_0) = h(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0, \mathbf{r}_0)$ ; 空间  $\mathbf{r}$  连续, 那么 (1) 式变为

$$p(\mathbf{r}) = \int f(\mathbf{r}_0) \cdot h(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) d\mathbf{r}_0. \quad (2)$$

系统简化为二维空间坐标系, 并且满足  $R_a(1 + L_2/L_1) > R_s(L_2/L_1)$ , 其中  $R_a$  为半影针孔半径;  $R_s$  为源区半径;  $L_2/L_1$  为系统几何放大率, 且  $AB = R_s$ ,  $CD = R_a$ , 那么射线半影成像系统成像原理由 (2) 式细化为 (3) 式, 如图 3 所示, 此情况为系统小孔成像的极限情况, 可得  $R_a(1 + L_2/L_1) = R_s(L_2/L_1)$ , 当孔径  $CD(R_a)$  变大时, 小孔成像变成半影成像.

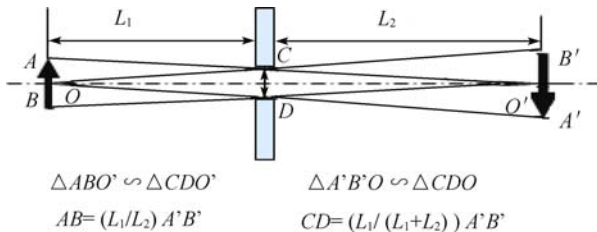


图 3 源区直径、孔径、像尺度几何比例关系

$$p(\chi) = h \left( \frac{L_1}{L_1 + L_2} \chi \right) ** f \left( -\frac{L_1}{L_2} \chi \right), \quad (3)$$

其中  $p(\chi)$  为射线半影图像空间分布函数,  $\chi$  为空间矢量,  $h(\chi)$  为孔径空间传递函数(点扩散函数),  $L_1$  为物距,  $L_2$  为相距;  $**$  为空间二维卷积符号;  $f(\chi)$  为源区射线通量空间分布函数(未知函数).

由此可知, 当系统具有空不变特性时, 全真原理 (1) 式可近似表述为 (3) 式, (3) 式可工程上实现, 见本文 3.3 节验证.

**1.2.2 半影图重建原理.** 图像重建的基本原理是对 (3) 式各项分别进行傅立叶变换, 即得到其各项在频域中的分布函数关系为

$$P(\xi) = F(\xi) \cdot H(\xi) + N(\xi),$$

$$\hat{F}(\xi) = F(\xi) + \frac{N(\xi)}{H(\xi)}. \quad (4)$$

由 (4) 式知在频域中, 即使准确得到退化函数(点扩散函数)也不能准确地复原未退化的图像  $F(\xi)$  的傅立叶反变换, 因为  $N(\xi)$  是一个随机函数, 而它的傅立叶变换未知. 还有更糟的情况, 如果退化函数(点扩散函数)在频域中是零或者非常小的值, 即信噪比(SNR)

非常弱时候,  $\frac{N(\xi)}{H(\xi)}$  之比很容易决定  $F(\xi)$  的估计值,

由此我们应用最小方差滤波(维纳滤波)(5)式顺利解决以上问题.

$$\hat{F}(\xi) = \left[ \frac{1}{H(\xi)} \frac{|H(\xi)|^2}{|H(\xi)|^2 + K} \right] P(\xi), \quad (5)$$

其中  $K$  是特殊常数, 是个与信噪比有关的量, 通常一个系统拥有一个经验值.

依据本文 1.2.1 节推算, 源区射线(中子)通量分布函数可用纯数学解析法通过数学计算得到半影图像; 也可用 MCNP 数字实验方法得到半影图像; 最后应用基于 (5) 式的重建算法分别得到源区图像, 详见本文 2.5 节.

## 2 蒙特卡罗数字成像实验

### 2.1 数字模型的建立

本文采用中子输运通用的模拟软件 MCNP, 依据实际设计的 ICF 中子成像诊断系统装置的位置分布和

各装置的材料组成, 选定能够真实地反映中子在系统中输运特性的关键部分, 建立系统模拟数字模型, 如图 4, 系统简化为源区、半影孔径、闪烁光纤阵列三大部分, 放射源为单能 14 MeV(DT)聚变中子源; 半影孔径为内径为双锥孔的钨孔, 钨孔厚为 7 cm, 孔内径为两段孔, 内径设置尺寸均与实际相等, 闪烁光纤阵列为  $100 \times 100$  根  $500 \mu\text{m}$  直径 BCF-10 闪烁光纤阵列. 其余空间为真空.

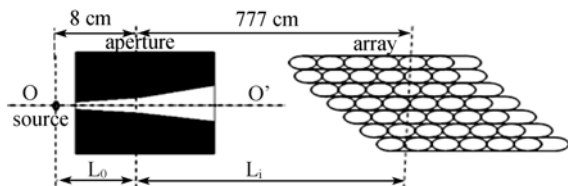


图 4 半影成像系统模型示意图

## 2.2 系统信噪比估算

系统信噪比(SNR)直接影响中子半影像函数重建质量. 这里噪声主要是由于半影孔壁材料散射中子对相面贡献造成的.

由于半影编码孔准直比约为  $\approx 10^2$  (几 cm/数百  $\mu\text{m}$ ) 光纤阵列相距源区约为 7 m 远. 能够到达光纤阵列的中子基本上近似平行系统主轴, 平行光纤纵轴, 少量的散射中子本底主要来自半影孔材料的散射. 图 5 为系统信号与孔径实体散射中子散射噪声计算模型示意图. 过程如下: 首先计算中子源系统信号强度. 在 MCNP 程序中设置中子源区抽样偏移角  $\alpha$ , 在角  $\alpha$  内均匀抽样, 孔径钨块实体部分 MCNP 计算中重要性设置为 0, 把探测器放到整个阵列, 由此得到系统的中子点源信号强度完全是穿透半影针孔无阻挡无碰撞中子的贡献; 其次再计算散射中子的情况. 点源在立体张角为  $\beta$  范围内各向同性发射中子, 此时用一小薄片空气把中子半影针孔封住且其 MCNP 计算中重要性设置为 0, 当 MCNP 运算时候, 使通过中子半影孔的信号中子完成湮灭在小空气薄片里面, 阻断中子信号在编码孔中的输运路径, 此时孔径为实物钨块, 模拟计算重要性还原为 1, 探测器位置不变, 探测器所测中子强度完全是半影针孔实体散射中子. 模拟结果如图 5 右所示

最终得到系统信噪比  $10^2$  左右, 由此半影孔壁钨材料中子散射本底可以忽略不计.

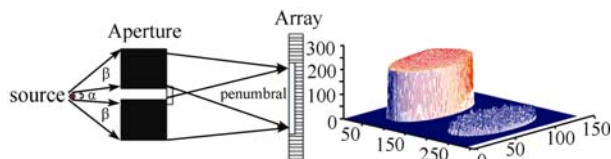


图 5 信噪比估算模型与模拟结果

## 2.3 系统空间不变(线性)冗余度估算

空不变原理如下:

如果  $T[\delta(x, y)] = h[kx, ky]$ , 那么

$$T[\delta(x-m, y-n)] = h[kx-km, ky-kn], \quad (6)$$

其中  $T[]$  为系统响应函数;  $\delta(x, y)$  为系统输入脉冲信号;  $h[]$  为系统响应输出信号;  $m, n$  为平面位移参数;  $k$  为系统放大率. 结合半影成像系统原理(3)式本系统空不变原理数学描述如下:

$$T[O(r)] = \text{PSF}(-Mr),$$

$$T[O(r-100 \mu\text{m})] = \text{PSF}[-M(r-100 \mu\text{m})]. \quad (7)$$

分别模拟计算了系统理想状态(几何光学)和实际系统构成条件下系统空不变性冗余度见图 6 所示. 图 6 上半部分是理想状态下即纯几何光学下源单元点  $O$  离轴  $100 \mu\text{m}$  处系统成像情况. 图 6 下半部分为系统实际情况全真模拟, 即考虑到半影编码孔材料中子散射以及探测光纤对中子的散射和反冲质子的串扰等. 这里分别计算了理想状态下和实际情况下, 中心点、离轴  $50 \mu\text{m}$  和  $100 \mu\text{m}$  的 4 种情况, 如图 7 所示. 理想情况下, 源区中心点系统空间分辨为  $5 \mu\text{m}$  (符合 Nyquist 定律), 离轴  $100 \mu\text{m}$  系统空间分辨为  $5.31 \mu\text{m}$ , 说明理想状态下源区离轴系统空间分辨恶化很慢, 与图 6 上半部分图像一致, 误差很小, 其  $0.31 \mu\text{m}$  的恶化肉眼是分辨不出来的; 实际情况模拟, 源区中心点  $5.5 \mu\text{m}$ , 离轴  $100 \mu\text{m}$  处系统空间分辨恶化到  $19.82 \mu\text{m}$ . 说明在  $20 \mu\text{m}$  系统空间分辨精度下, 可以认为系统为空不变系统.

## 2.4 光纤中的反冲质子

中子与光纤材料中氢原子核发生弹性碰撞形成反冲质子, 反冲质子电离激发出荧光物质发出荧光, 探测器俘获荧光从而确定中子在光纤中的“弹着点”. 反冲质子在光纤中的射程决定“弹着点”荧光斑的大小, 荧光扩散斑是造成系统空间分辨恶化重要原因之一. 如图 8 所示为 Geant4 模拟中子入射光纤时由

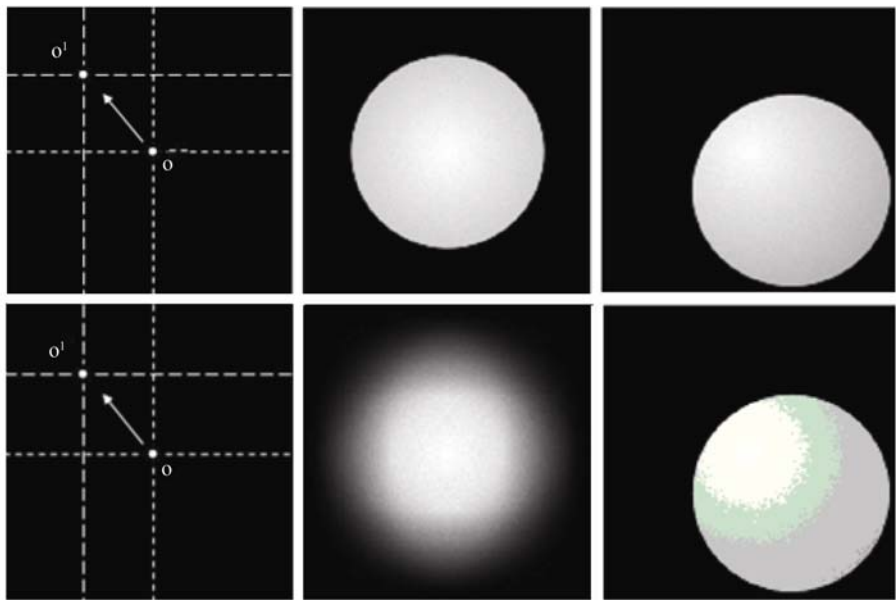


图 6 系统空不变冗余度估算. 图 6 上为理想状态; 图 6 下为系统全真模拟结果

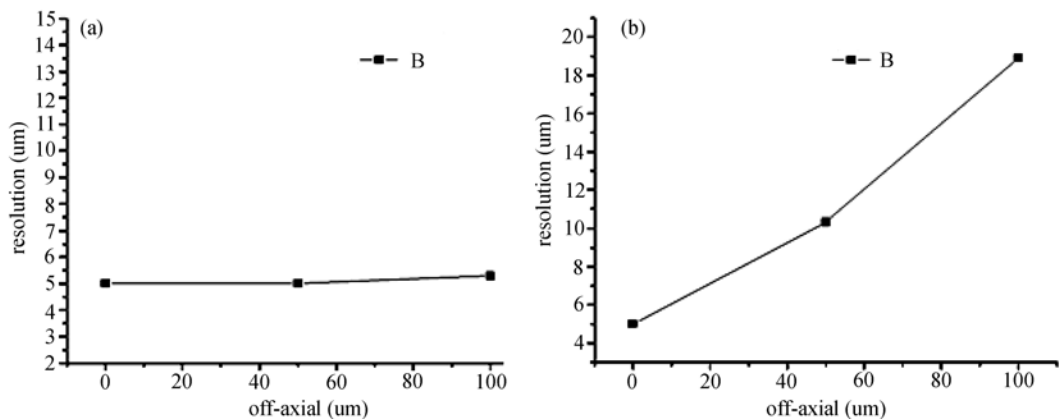


图 7 离轴对系统源区分辨恶化影响. (a)为理想状态; (b)为系统全真模拟结果

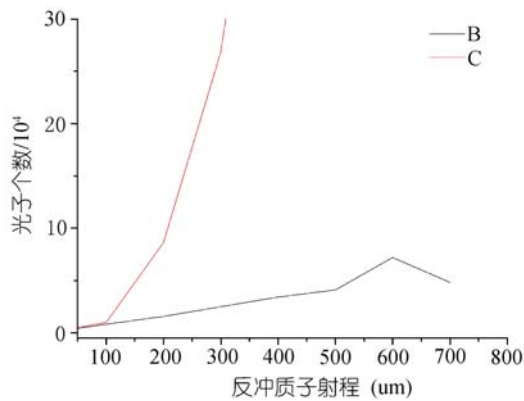


图 8 反冲质子射程光子数模拟结果. B 为 14 MeV 中子垂直光纤轴入射; C 为中子平行光纤轴入射

于弹性散射产生的反冲质子射程与其电离激发产生的荧光光子数关系结果: 当中子垂直光纤轴入射时, 产生的光子数与反冲质子射程成正比, 在 600  $\mu\text{m}$  处还可以看到 Bragg 峰, 当中子平行光纤轴入射时, 发现反冲质子激发光子主要集中在射程 0~300  $\mu\text{m}$  内, 这是由于反冲质子射程投影到出射端面很短, 可以推断反冲质子大部分沉积到直径为 500  $\mu\text{m}$  的单根光纤材料中. 这些模拟结果和文献[17]报道的实验结果一致.

2.5 4 个独立单元点源的编码

源区单元点概念上为系统对源区最小分辨的极

限区域, 理论上源区单元点具有完全的点源特性, 各向同性出射射线与粒子, 单元点粒度越小源区单位面积包含单元点越多, 说明系统对源区分辨越好, 重建获得源区图像越清晰.

分别用数学解析法和 MCNP 数字模拟实验法获得了源区中 4 个独立的单元点的两幅“半影图像”, 并用同一重建算法进行反演重建, 如图 9 所示, 其中图 9(a)~9(c)是纯数学解析法过程结果, 图 9(d)~9(f)是 MCNP 数字模拟实验过程结果, 其中图 9(d)是源区放大 100 倍示意图. 图 9(b)和图 9(e)是所谓的“半影图像”. 图 9(b)和图 9(e)是由 4 个近似全等的圆形光斑重叠组成, 图 9(b)和图 9(e)中的区域 4, 3, 2, 1 分别为光斑重合叠加 4, 3, 2, 1 次, 如图 9 左上角二维坐标图, 点 A, B, C, D, E 对应图 9(b)箭头传过各光斑边界点 A, B, C, D, E, 图 9 右下角二维坐标图表示实验模拟情况, 图释同理如上. 总之, 数学解析计算和实验模拟数据都证明了图 9(b)和图 9(e)的 4 个全等光斑“重合叠加性”, 即灰度成倍递增、明显呈 4 个台阶分布. 图 9(b)和图 9(e)略有不同: 图 9(b)的 4 个圆形光斑较紧凑, 图 9(e)的 4 个圆形光斑较分散. 这是因为图 9(b)是用同一个中心点扩散函数卷积得到的图像; 而图 9(e)是 4 个独立单元点通过半影针孔实际模拟投影得到的图像(更接近物理事实), 成像过程中源区每个点用的是各自的点扩散函数(由于系统空不变, 它们之间差别很小), 其成像过程是(1)式全真的演绎, 因此得到的 4 点投影图像较分散.

用相同的重建反演滤波程序对图 9(b)和图 9(e)进

行了重建还原得到如图 9(c)和图 9(f)所示, 其中图 9(c)重建效果很好, 与原图 4 点完全相同, 这是因为这个过程是纯数学卷积与逆卷积运算. 图 9(f)重建效果较差, 这是因为 MCNP 模拟比较符合中子实际的成像输运情况, 不可避免地引进了许多不利因素的贡献, 但等距四方单元 4 点也明显地区分开来. 由此可以判定图 9(b)和图 9(e)确实是 4 个独立单元点的半影图像, 其中区域 4 为本影区, 区域 1, 2, 3 为半影区. 随着源区单元点的增多, 中心区相面“光斑”重合线性叠加, 图 9(b)和图 9(e)就变成真正的源区半影图像.

### 3 中子半影成像系统实验可行性分析

#### 3.1 源区中子半影图像获取

惯性约束聚变(ICF)实验中, 靶球氘氚(DT)聚变反应中心点是半径约为  $100\text{ }\mu\text{m}$  左右的高密度球实体, 其平面投影面积为  $\pi \times (100^2)\text{ }\mu\text{m}^2$ . 在此以上模拟计算结果基础上, 我们预置了  $200 \times 200\text{ }\mu\text{m}^2$  正方形大面积中子源区, 源为单能  $14\text{ MeV}$ DT 聚变中子源如图 10(a)所示, 编写 MCNP 模拟程序, 在西安交大核技术学院高速并行计算机工作站进行数字实验, 得到源区在闪烁光纤阵列相面上的中子半影图像, 第一次获得了与实际情况相当的大面积聚变反应源区的蒙特卡罗模拟中子半影图像, 如图 10(b), 图 10(c)为其半影图像的立体灰度分布图. 半影图像图 10(b)中间的区域为本影区, 源区中每个单元点都对本影区有贡献, 在数据处理过程中本影区的强度可归一全影区的强度的

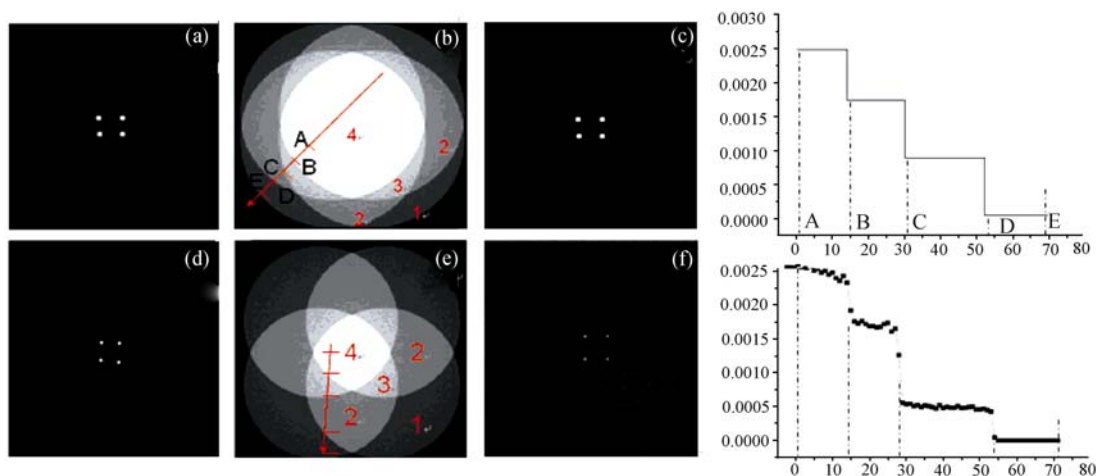


图 9 (a), (b), (c), (d), (e), (f)源区四单元点的数字投影实验与重建

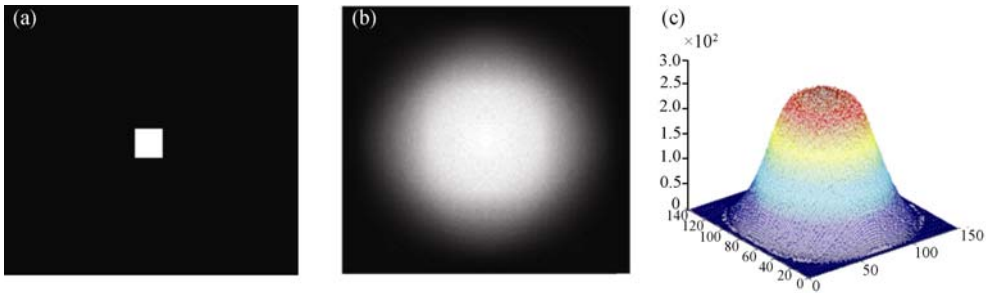


图 10 (a) 方形源区; (b) 闪烁光纤阵列相面半影图; (c) 半影图的三维立体灰度图

分布; 半影区为本影区外强度梯度分布区域<sup>[1]</sup>. 系统对源区分辨越好, 说明源区单位面积上单元点越多, 重建出的源区图像越清晰. 反之, 系统对源区分辨越差, 说明单元点粒度大、源区单位面积上单元点分布越少, 半影区强度梯度越陡峭, 甚至出现明显台阶状分布. 重建的源区图像越模糊.

3.2 源区重建与结果分析

利用改进型的维纳滤波重建方法和本文 3.3 节中源区中心单元点系统响应函数(点扩散函数 PSF)对实验半影图像图 10(b)中进行了重建反演, 获得图 11(b). 图 11(c)为图 11(b)中心部分放大 5 倍图, 在图 11(b)中可以看到方形源周围的响铃噪声, 但是与重建源区图像能够明显区分开来, 图 11(c)可以看到边缘重影, 这是由于孔径内径边缘效应造成的.

为进一步验证该系统实验与重建算法的可行性, 我们预置了环形源区, 如图 11(d), 应用相同的改进型维纳滤波重建, 重建效果良好, 如图 11(e)和图 11(f), 从原理上证明该套中子半影成像系统实验可行性以及重建算法的可靠性.

4 总结与讨论

放射源区空间分辨在理论上受限于成像射线与粒子的衍射极限<sup>[16]</sup>(diffraction limit)14 MeV 的高能中子物质波约为  $10^{-5}$  nm, 随着高度精密数控机床和各种制孔技术的发展, 成像孔径已经达到亚毫米(百微米)量级, 在空间分辨要求比较精确的情况下可以观察到成像孔径的边缘导致微弱的射线衍射现象, 本文采用的半影成像针孔孔径 600  $\mu\text{m}$  左右, 距离衍射极限相差甚远.

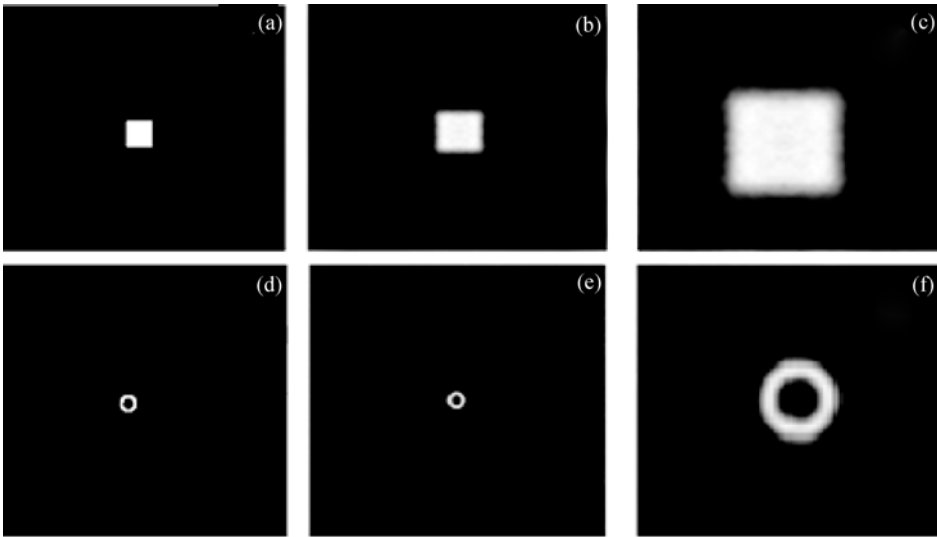


图 11 源区重建. (a), (d)分别为正方形和环形源区; (b)为图 10 中重建的结果; (c)为(b)放大 2.5 倍效果图; (e)为(d)重建结果; (f)为(e)放大 5 倍效果图

通过对 4 个独立单元点的解析计算和模拟实验, 揭示了射线半影成像的编码实质即半影图像就是源区中各个单元点通过半影针孔在探测器相面形成的全等“光斑”的重合叠加, 重合叠加次数最多的中心区域为本影区, 如图 1 所示, 源区每个单元点源都对本影区有贡献, 因此本影区可作为整个辐射图像的归一参数; 重合叠加次数依次递减的区域为半影区, 半影区包含着辐射图像的全部信息. 证明了源区面须假设为由离散单元点组成, 单元点各向同性发射射线与粒子(中子); 用于成像射线与粒子呈直线传播(即射线与粒子从源区单元点(出射点)到探测器俘获点呈现近似光

学行为), 俘获点组成俘获面, 一个单元点(出射点)对应一个俘获面, 在一个俘获面内, 俘获点概率密度均匀相等; 辐射半影图像是俘获面重合叠加而成.

根据实际设计与实物装置建立模型, 获得与 ICF 靶丸中心聚变靶点约同一大小尺度范围的源区的整幅半影拟图像, 检验了本课题组研发的改进型维纳滤波重建算法, 从理论原理上验证了西安交大核科学技术学院建立的实物中子半影成像诊断系统的实验可行性, 与重建算法的可靠性. 今后工作我们将详细讨论半影编码孔的边缘效应对系统点扩散函数的负面贡献及其给重建工作带来的困难.

## 参考文献

- 1 Nugent K A, Luther-Davies B. Penumbra imaging of high energy X-rays from laser-produced plasmas. *Opt Commun*, 1984, 49: 393—401[[doi](#)]
- 2 Ress D, Lerche R A, Eill R J, et al. Neutron imaging of laser-fusion targets. *Science*, 1988, 241: 956—958[[doi](#)]
- 3 Mosinski G, Roy B. Lawrence Livermore National Laboratory CEA Bruyères le Châtel. Department of Energy's National Nuclear Security Administration in the U S. 1983
- 4 Sommargren G E, Lerche R A. Neutron Imaging of ICF Target Plasmas, Lawrence Livermore National Laboratory. Department of Energy's National Nuclear Security Administration in the U S. 1988
- 5 Disier L, Rouyer A, Wilson D C, et al. High-resolution neutron imaging of laser imploded DT targets. *Nucl Instrum Meth A*, 2002, 496: 502—506
- 6 Chen Y W, Otsuki K, Nakao Z. Blind reconstruction of X-ray penumbral images. *Rev Sci Instrum*, 1998, 69(5): 1966—1968[[doi](#)]
- 7 Nugent K A. Coded imaging of thermonuclear neutron. *Rev Sci Instrum*, 1988, 59(8): 1658—1659[[doi](#)]
- 8 Rouyer A. A new simple method for decoding penumbra image: The filtered autocorrelation. *Rev Sci Instrum*, 2003, 74(3): 1234—1236[[doi](#)]
- 9 Disier L, Rouyer A, Wilson D C, et al. High-resolution neutron imaging of laser imploded DT targets. *Nucl Instrum Meth A*, 2002, 489(123): 496—502[[doi](#)]
- 10 陈法新, 杨建伦, 温树槐. ICF 中子针孔成像数值模拟研究. *强激光与粒子束*, 2005, 17(6): 883—887
- 11 刘东剑, 唐旭环, 赵宗清, 等. 中子半影成像图像反演方法研究. *强激光与粒子束*, 2006, 18(7): 1199—1202
- 12 陈法新, 郑坚, 杨建伦. 中子厚针孔成像数值模拟研究. *物理学报*, 2006, 55(11): 5947—5952
- 13 Ress D, Ress D. Neutron imaging for inertial-confinement-fusion experiment. *IEEE T Nucl Sci*, 37(2): 155—160[[doi](#)]
- 14 Wu Y L. Crosstalk and time response of a plastic scintillation optical fibers array for neutron imaging. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Nuclear Engineering*, Vol1. Orlando: ASME, 2008. 895—899
- 15 Hu H S, Wang Q S, Qin J, et al. Study on composite material for shielding mixed neutron and  $\gamma$ -rays. *IEEE T Nucl Sci*, 2008, 55(4): 2376—2384[[doi](#)]
- 16 Geoff G, Iain M. Reconstruction of X-ray sources from penumbral images. *Comput Graph Image Process*, 1979, 11: 227—241
- 17 Disier L, Rouyer A, Bourgade J L, et al. Capillary detector with deuterated scintillator for inertial confinement fusion neutron images. *Nucl Rev Sci Instrum*, 2004, 75: 2134—2139[[doi](#)]