

# 瞄准精度对中子半影成像的影响\*

赵宗清<sup>1)†</sup> 丁永坤<sup>1)†</sup> 郝轶聃<sup>1)</sup> 袁永腾<sup>1)</sup> 蒲以康<sup>2)</sup>

1) 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) 清华大学工程物理系, 北京 100084)

(2007 年 11 月 17 日收到, 2007 年 12 月 17 日收到修改稿)

在 Monte Carlo 方法模拟中子半影成像的基础上, 对视场内点的空间线性不变性进行了研究. 在视场范围内, 离轴点产生了与离轴距离成正比的展宽现象, 但点的积分强度保持了很好一致性, 证明系统满足线性不变性假设. 利用这一结果, 分析了瞄准精度对成像系统的影响. 结果表明, 靶心在物面上的径向偏差应控制在  $50 \mu\text{m}$  之内, 物距误差控制应在  $300 \mu\text{m}$  以内, 编码孔旋转弧度须小于  $0.1 \text{ mrad}$ .

关键词: 空间线性不变性, 瞄准精度, 展宽效应, 图像畸变

PACC: 5270, 1420C

## 1. 引 言

中子成像技术可以获得内爆中子产生区域图像, 从而验证内爆动力学计算的正确性, 了解靶丸压缩与产额之间的关系, 获得各种黑腔、靶丸设计的性能参数, 达到优化靶及黑腔设计等目的. 常用的中子成像技术有针孔成像、半影成像两种. 自从 1988 年实现中子成像<sup>[1]</sup>, 此后, 美国、法国和日本的科学家<sup>[2-9]</sup>在对中子成像的模拟、解谱和实验等方面进行了深入研究. 而在即将建成的美国 NIF 装置和法国 LMJ 装置上要实现  $5-10 \mu\text{m}$  的分辨率.

中子半影成像与中子针孔成像相比, 它的成像立体角大、灵敏度高, 对源的中子产额要求较低. 考虑到国内目前的具体情况, 中子半影成像技术是一种比较理想可行的内爆诊断方法. 我们已经实现了中子半影成像的蒙卡模拟和解谱方法的初步研究<sup>[10-12]</sup>. 本文正是在以前研究的基础上, 利用蒙卡模拟, 对视场内点的空间不变性近似对图像重建的影响进行了研究. 同时, 对靶心与轴心的距离偏差、点源与物面距离不同和编码孔旋转一定弧度等瞄准精度对成像系统的影响进行了分析.

## 2. 空间线性不变系统

对一个线性系统, 设输入信号为  $f_1(x, y)$  和  $f_2(x, y)$ , 分别产生输出信号为  $g_1(x, y)$  和  $g_2(x, y)$ , 系统作用的算符用  $\mathcal{H}$  表示, 即

$$\mathcal{H}\{f_1(x, y)\} = g_1(x, y),$$

$$\mathcal{H}\{f_2(x, y)\} = g_2(x, y).$$

若输入函数在空间发生了平移, 且对任意实数  $a_1$  和  $a_2$  有

$$\begin{aligned} & \mathcal{H}\{a_1 f_1(x - x_0, y - y_0) \\ & + a_2 f_2(x - x_0, y - y_0)\} \\ & = a_1 g_1(x - x_0, y - y_0) \\ & + a_2 g_2(x - x_0, y - y_0), \end{aligned}$$

则称该系统为线性空间不变系统, 简称空不变系统. 空不变系统对输入信号空间位置的平移所产生的唯一效应是, 其输出信号产生了同样的位置平移.

## 3. 空间线性不变性近似对图像重建的影响

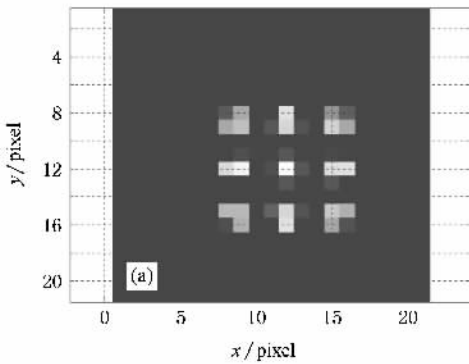
在图像重建中, 我们通常认为系统近似满足空间线性不变性, 并采用轴心处的点扩散函数  $H_0(x -$

\* 国家高技术研究发展计划(863)批准号 2007AA804902 和高温高密度等离子体物理国家重点实验室创新基金资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: ding-yongkun@vip.sina.com

$u, y - v$ ) 作为理想的点扩散函数. 为了考察在实际实验中靶心位置与轴心的偏离可能对图像重建产生的影响, 我们用蒙特卡模拟了物平面上一个  $3 \times 3$  的等强点阵所成的像, 并利用理想点扩散函数进行图像重建. 系统的视场半径为  $100 \mu\text{m}$ , 而点阵间隔为  $50 \mu\text{m}$ , 因此点阵覆盖了大部分有效视场. 重建采用非线性迭代法, 可以有效地消除背景噪声的影响, 得到一个均匀的本底. 非线性迭代法将有另文详述, 此处只给出其结果. 文中所使用的解谱方法均为非线性迭代法, 后文不再提示.

重建结果如图 1(a) 所示. 易见, 点源距中心距



离越远, 重建的物点展宽越大. 这可能是由于系统对空间线性不变性的偏离引起的. 物面分布, 像面分布和点扩散函数服从以下关系:

$$g(u, v) = \int f(x, y) H(x, y, u, v) dx dy$$

$$= \int f(x, y) H_0(x - u, y - v) dx dy,$$

其中,  $g(u, v)$  为像面分布,  $f(x, y)$  为实际的物面分布,  $f'(x, y)$  为重建得到的物面分布,  $H(x, y, u, v)$  为随每个物点坐标  $(x, y)$  变化的点扩散函数,  $H_0(x - u, y - v)$  是轴心的点扩散函数.

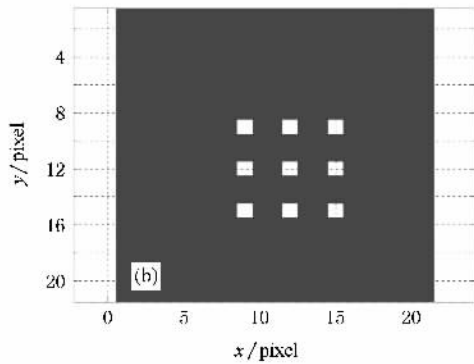


图 1 点阵的图像重建结果 (a) 原始结果 (b) 积分强度

在实际重建时, 通常使用空间平移不变的标准点扩散函数  $H_0(x - u, y - v)$ , 它与  $H(x, y, u, v)$  在物面离轴点处的偏差破坏了系统的线性空间不变性. 然而  $H(x, y, u, v)$  和  $H_0(x - u, y - v)$  在物平面  $(0, 0)$  处是等价的, 因此它们的差异仅是离轴距离  $r$  ( $= \sqrt{x^2 + y^2}$ ) 的同级小量. 即展宽随点距中心的距离线性增加, 这也正是在图 1(a) 中所看到的现象. 由图 1(a) 可见, 当偏离 1 个点阵间隔 (即  $50 \mu\text{m}$ ) 时, 展宽影响尚可接受. 因此在实际摆放源的位置时, 靶心在物面上的径向偏差至少控制在  $50 \mu\text{m}$  之内.

然而我们发现, 对不同点处的重建强度分布按展宽特征长度积分就能较好地消除上述效应. 结果如图 1(b), 其中各点的绝对强度的偏离不超过 3%. 这一结果说明, 在积分强度意义下, 系统仍然适用空间线性不变性近似.

#### 4. 点与物面距离不同引起的强度误差

考察物面轴上  $50 \mu\text{m}$  和轴下  $50 \mu\text{m}$  的两个强度相等的点源. 从第 2 部分可知, 对离轴的点, 会产生

与径向偏差成正比的展宽. 因此, 在本节的讨论中, 我们使用的强度是按展宽特征长度得到的积分强度.

开始时, 两点放在与编码孔等距离处, 图像重建得到两点的强度相等. 然后, 我们将轴上  $50 \mu\text{m}$  的点向远离物面的方向移动, 而保持轴下  $50 \mu\text{m}$  的点在物面上不变. 如图 2 所示, 源移动的距离为  $D$ , 我们考察  $D$  移动时两点相对强度的变化 (以不动的点源强度归一化).

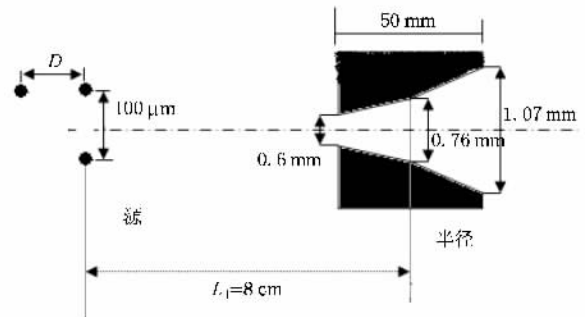


图 2 源的移动示意图

从图 3 中可以看出, 源向远离编码孔的方向移

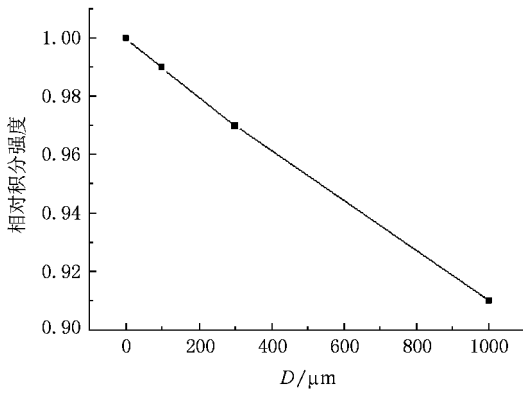


图3 相对积分强度随  $D$  的关系

动时重建得到的源的强度会缓慢地减少. 当两个点源距编码孔的距离为  $100 \mu\text{m}$  时, 源的强度大概有 1% 的衰减; 当两个点源距编码孔的距离为  $300 \mu\text{m}$  时, 源的强度大概有 3% 的衰减. 因此, 只要实际的实验中源距编码孔距离的偏差能保证在  $300 \mu\text{m}$  之内, 图像重建引起的积分强度误差就能控制在 3% 之内, 而且不会引起进一步的点展宽现象.

### 5. 编码孔旋转对图像质量的影响

在实验中, 由于调节系统的误差, 很难保证编码孔的轴与物面保持垂直. 因此, 需要定量分析编码孔旋转对重建图像质量的影响. 考虑编码孔旋转一定弧度, 考察弧度对重建图像的影响. 编码孔旋转的示意图如图 4 所示.

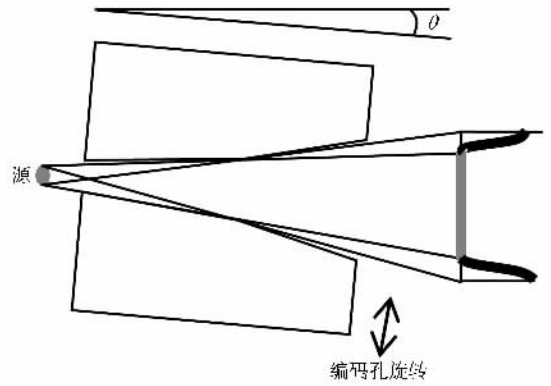


图4 编码孔旋转示意图

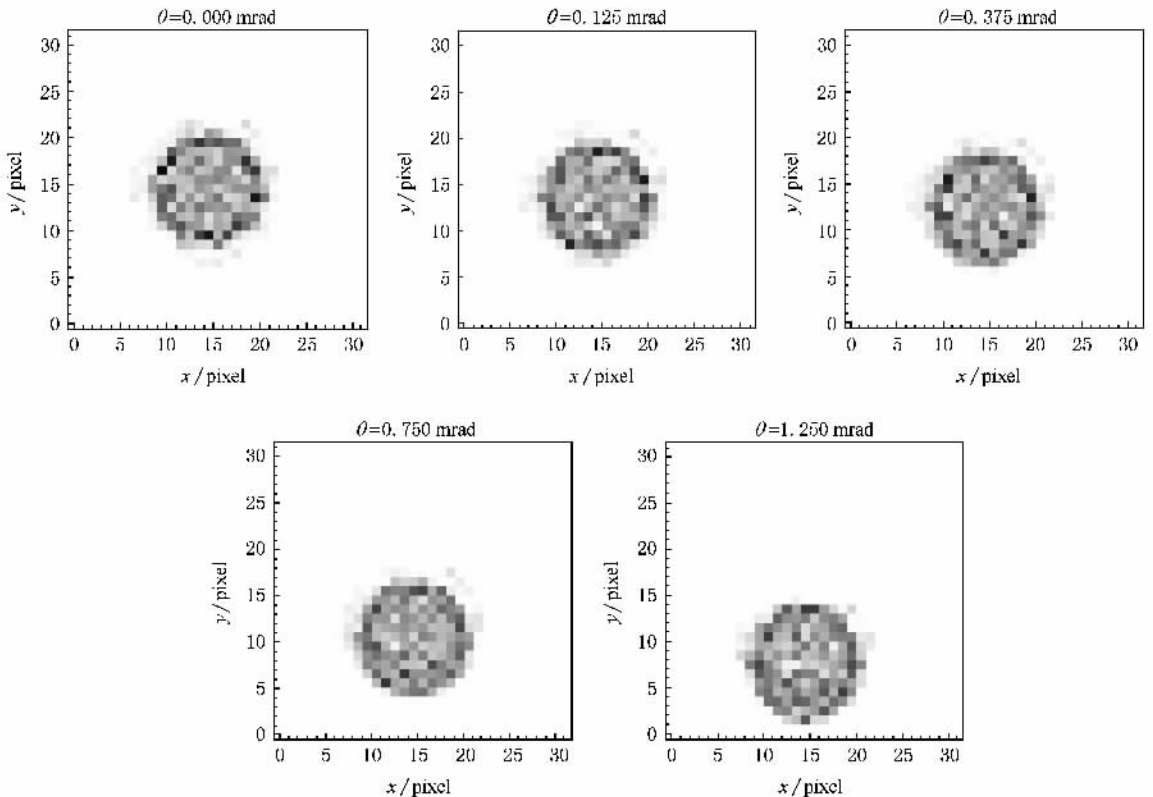


图5 编码孔旋转引起的图像畸变

我们模拟了一个半径为  $100 \mu\text{m}$  的均匀的各向同性平面源, 在编码孔旋转不同弧度的情况下得到

的重建图像. 由第 2 节结论可知, 点展宽现象在物平面上是各向同性的, 所以对我们考察的对称的源,

点展宽现象只引起图像边缘的模糊,不会造成图像的变形.因此在这里可以不考虑点展宽现象.

编码孔旋转引起的图像畸变如图 5 所示.当编码孔没有旋转时,重建得到一个比较理想的圆面;当旋转弧度约 0.1 mrad 时,重建源的形状基本没有什么变化,只是位置稍稍往下移动了一点;当弧度为 0.375 mrad 时,重建源的图像在  $y$  轴方向开始有可见的拉伸,而且源的位置往下偏移也比较大.继续增大旋转弧度到 1 mrad,图像的拉伸更加厉害,源的位置也发生了更大的偏移,有可能偏离出探测面.由此可见,实际设计调节系统时,编码孔的旋转弧度应该控制在约 0.1 mrad 以内.

## 6. 结 论

我们实现了 Monte Carlo 方法中子半影成像的数

值模拟.利用数值模拟结果,研究了视场内空间线性不变性近似对图像重建的影响.通过对点阵的图像重建,我们发现视场内的点源会产生与离轴距离成正比的展宽现象,但点的积分强度保持了很好的线性不变性.在此基础上,我们详细考察了瞄准精度对中子成像系统的影响,得到以下结论:

1. 靶心在物面上的径向偏差应控制在  $50\ \mu\text{m}$  之内,这样可以减少点展宽效应.
2. 将点源与物面的距离控制在  $300\ \mu\text{m}$  之内,图像强度的重建误差可以忽略.
3. 编码孔旋转弧度小于 0.1 mrad 时,图像基本上没有变形.

- 
- [ 1 ] Ress D ,Lerche R A ,Ellis R J *et al* 1988 *Science* **241** 956
- [ 2 ] Nugent K A 1988 *Rev. Sci. Instrum.* **59** 1658
- [ 3 ] Disdier L ,Rouyer A ,Wilson D C *et al* 2002 *Nuc. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A* **489** 496
- [ 4 ] Disdier L ,Rouyer A ,Fedotoff A *et al* 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 1832
- [ 5 ] Grim G P ,Morgan G L ,Wilke M D *et al* 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 3573
- [ 6 ] Disdier L ,Rouyer A ,Lantuéjoul I *et al* 2006 *Physics of Plasmas* **13** 056317
- [ 7 ] Delaga O ,Lerche R A ,Sangster T C *et al* 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 869
- [ 8 ] Lerche R A ,Izumi N ,Fisher R K *et al* 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 1709
- [ 9 ] Chen Y W ,Kodama R ,Nakao Z 1998 *IEEE Transactions on Nuclear Science* **45** 992
- [ 10 ] Chen F X ,Zheng J ,Yang J L 2006 *Acta. Phys. Sin.* **55** 5947 ( in Chinese ) [ 陈法新、郑 坚、杨建伦 2006 物理学报 **55** 5947 ]
- [ 11 ] Zhao Z Q ,Ding Y K ,Liu D J ,Tang C H ,Wen S H ,Pu Y K 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 1203 ( in Chinese ) [ 赵宗清、丁永坤、刘东剑、唐昶环、温树槐、蒲以康 2006 强激光与粒子束 **18** 1203 ]
- [ 12 ] Zhao Z Q ,Ding Y K ,Dong J J *et al* 2007 *Plasma Phys. Control. Fusion* **49** 1145
- [ 13 ] Zhang F Q ,Yang J L ,Li Z H ,Zhong Y H ,Ye F ,Qin Y ,Chen F X , Ying C T ,Liu G J 2007 *Acta. Phys. Sin.* **56** 583 ( in Chinese ) [ 章法强、杨建伦、李正宏、钟耀华、叶 凡、秦 义、陈法新、应纯同、刘广均 2007 物理学报 **56** 583 ]

# The effect of alignment precision in neutron penumbral imaging<sup>\*</sup>

Zhao Zong-Qing<sup>1,2)</sup> Ding Yong-Kun<sup>1)†</sup> Hao Yi-Dan<sup>1)</sup> Yuan Yong-Teng<sup>1)</sup> Pu Yi-Kang<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> *Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*

<sup>2)</sup> *Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

( Received 17 November 2007 ; revised manuscript received 17 December 2007 )

## Abstract

Based on Monte Carlo simulation of neutron penumbral imaging, the linear space invariance is researched. In the field of view, the point's broadening linearly depends on the axial distance on the object plane, but the integrated intensity keeps linear space invariance. Using this result, the alignment precision is analyzed. The axial error of the target's center on the object plane should be controlled within  $50 \mu\text{m}$ . The point source should be less than  $300 \mu\text{m}$  away from the object plane. The aperture rotation should be within  $0.1 \text{ mrad}$ .

**Keywords** : space linear invariance, alignment precision, broadening effect, image distortion

**PACC** : 5270, 1420C

<sup>\*</sup> Project supported by the National High Technology and Development Program ( Grant No. 2007AA804902 ) and Creative Foundation of State Key Laboratory for High-Density High-Temperature Plasma Physics.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : ding-yongkun@vip.sina.com